

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Бурау Н. І.

“    ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Дипломна робота**

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) 05100303 Прилади і системи орієнтації та  
навігації

на тему «Сейсмічний приймач»

Виконала:

студентка IV курсу, групи ПГ – 51

Мішура Карина Артемівна

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:

д.т.н., професор

Бурау Надія Іванівна

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент:

д.т.н., професор

Маслов Володимир Петрович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет

приладобудівний

Кафедра

приладів і систем орієнтації та навігації

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація)

05100303 Прилади і системи орієнтації

та навігації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на дипломну роботу студентці**

Мішурі Карині Артемівні

1. Тема проекту (роботи)

Сейсмічний приймач

керівник роботи

д.т.н., проф. Бурау Н. І.

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи

14.06.2019

3. Вихідні дані до роботи

Сейсмічний приймач (СП) ВВП-3,

стенди малих та великих переміщень, часові реалізації вихідного сигналу СП

при різних динамічних впливах (випадкова вібрація, гармонічна вібрація з

частотою 0.75 Гц, 1 Гц), частота дискретизації  $f_g = 1000$  Гц



## **Essay**

Author: Mishura K. A.

Theme of the thesis "Seismic receiver".

The volume of the thesis is 65 pages, it contains 37 pictures, 3 tables and 14 sources of literature.

In this paper an analysis of frequency and scale-time methods of seismic receiver information processing is carried out. Seismic receiver (SR) is an electromechanical device in which the energy of oscillations of the soil is transformed into electric, based on the use of the principle of inert mass.

In this paper, for the real realizations of vibration signals, spectral density for different types of perturbation of the location of the SR was obtained and analyzed. The continuous wavelet transform is applied and the vibration signals are decomposed into a set of approximations and details. Spectral density is determined for elements of wavelet decomposition.

## **Реферат**

Автор: Мішура К. А.

Тема дипломної роботи «Сейсмічний приймач».

Обсяг дипломного роботи 65 сторінок, вона містить 37 рисунків, 3 таблиці та 14 джерел літератури.

В даній роботі проведено аналіз частотних та масштабно-часових методів обробки інформації сейсмічних приймачів. Сейсмічний приймач (СП) – це електромеханічний пристрій, в якого енергія коливань ґрунту перетворюється на електричну, на основі використання принципу інертної маси.

В даній роботі для реальних реалізацій вібраційних сигналів отримано та проаналізовано спектральну щільність для різних типів збурення місця встановлення СП. Застосовано неперервне вейвлет-перетворення і виконано розкладання вібраційних сигналів у набір апроксимацій і деталей. Для елементів вейвлет-розкладання визначено спектральну щільність.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень

Вступ

### РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1	Перевірка споруд на сейсмічну стійкість.....	8
1.2	Теоретичні відомості про вібраційні вимірювання.....	10
1.3	Системи для перевірки споруд на сейсміку.....	12
1.3.1	Синусоїдальна вібрація.....	13
1.3.2	Випадкова вібрація.....	15
1.3.3	Ударне навантаження.....	16
1.4	Сейсмічні перетворювачі.....	17

### РОЗДІЛ 2. СЕЙСМІЧНИЙ ПРИЙМАЧ ВЕЛИКИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

2.1	Загальна характеристика сейсмоприймача.....	23
2.2	Опис стендів та методики досліджень сейсмоприймачів.....	29
2.2.1	Пристрій для перевірки технічного стану сейсмодатчиків малих переміщень	29
2.2.2	Пристрій перевірки технічного стану сейсмоприймачів для вимірювання великих переміщень	32

### РОЗДІЛ 3. ОБРОБКА СИГНАЛІВ СЕЙСМІЧНОГО ПРИЙМАЧА ПРИ ДИНАМІЧНИХ ЗБУРЕННЯХ

3.1	Методи обробки інформації.....	40
3.1.1	Спектральний аналіз.....	40
3.1.2	Вейвлет – аналіз.....	41
3.2	Результати обробки сигналів.....	43

Висновки

Література

Додатки

## **Перелік скорочень**

- АХ - амплітудна характеристика
- АЧХ - амплітудно – частотна характеристика
- ВП - Вейвлет - перетворення
- МСК - моніторинг стану конструкцій
- СКЗ - середньоквадратичне значення
- СП - сейсмічний приймач

## **Вступ**

У наш час до сейсмоприймачів зростає інтерес. Вони багато де використовуються, наприклад: при будівництві сейсмічних локаторів, для моніторингу сейсмічної активності, для захисту нафтогазових комунікацій, для проведення траєкторних випробувань. Також їх застосовують для систем діагностики і моніторингу технічного стану конструкцій, будинків, споруд і мостів. Але не тільки для цього. Наприклад, з плином часу виникає необхідність знесення споруд. Це зазвичай споруди, які прийшли в непридатність. Тому перед знесенням будинку обов'язковою умовою є проведення необхідних попередніх розрахунків з метою уникнення можливих небезпечних ситуацій, здатних спричинити за собою деформацію або навіть руйнування прилеглих будинків, комунікацій, трубопроводів.

Отже, застосування сейсмічних приймачів в діагностичних комплексах різноманітних інженерних споруд, в системах моніторингу сейсмічної активності висуває жорсткі вимоги до достовірності їх показань, особливо в умовах комплексного впливу динамічних збурень, обумовлених як природними, так і техногенними факторами.



## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1 Перевірка споруд на сейсмічну стійкість

В цивільних спорудах, які експлуатуються в умовах сейсмічного впливу, бувають фізичні зміни, які негативно впливають на їх безпеку і майбутні експлуатаційні характеристики. Ці фізичні зміни називають структурними ушкодженнями. Вони залежать від типу системи опору бічній силі і можуть включати в себе руйнування бетону і / або сильне розтріскування елементів конструкції, руйнування з'єднань, жолоблення тонких або пластинчастих елементів, деформацію і / або руйнування елементів з конструкційної сталі, в тому числі. Після сильних землетрусів важливо оцінити стан цілісності конструкцій (діагностика і прогнозування ушкоджень), щоб звести до мінімуму життєві та економічні втрати [1].

Досвід минулих досліджень в області землетрусів показав [1], що в цілому руйнування елементів конструкції, схильних до гістерезисного (циклічного) навантаження, є функцією максимальних деформацій і розсіяною гістерезисною енергією. З цього випливає, що для ефективного визначення ступеня цілісності конструкції після екстремальних подій необхідно оцінити часові рамки структурного відгуку в декількох просторових положеннях. Найбільш прямий підхід до вирішення цього завдання полягає в розробці структурної моделі з використанням виміряного базового прискорення (якщо воно є) в якості вхідних впливів для моделі. Якщо запис наземного прискорення недоступний, можна використовувати стохастичну модель базового руху [1]. Хоча цей прямий підхід дозволяє оцінити максимальний відгук з прийнятною точністю, оцінки повних часових характеристик, як правило, ненадійні, що призводить до неточних оцінок розсіяної гістерезисної енергії і стану пошкодження. Основним джерелом помилок, які сприяють розбіжності між оціненим і вимірним відгуком, є помилки моделювання, тобто невизначеність у функціональній формі

математичної моделі і значеннях параметрів, які її визначають, і труднощі точного вимірювання основних компоненти базового руху в різних місцях.

Можливість оцінки і прогнозування структурної моделі може бути істотно поліпшена шляхом включення внутрішньої інформації, яка представляє інтерес структури, що зазвичай витягується з вимірів розріджених вібраційних відгуків. Підходи, засновані на вібраційному моніторингу стану конструкцій (МСК), спрямовані на об'єднання структурної моделі з вимірами вібрації, отриманими до, під час і / або після важкої події, для оцінки стану структурної цілісності (діагностики) та оцінки строку корисного використання (прогноз) системи цивільної інфраструктури. Серед різних підходів, розроблених для об'єднання математичної моделі і вимірювання відгуку, в останні роки особливу увагу привернули байєсовські методи [1]. Такий підхід забезпечує логічно несуперечливу, надійну і строгу теорію, яку можна використовувати для характеристики невизначеності моделювання для широкого класу задач. Проблеми кількісного визначення та оцінки невизначеності моделювання можна класифікувати як параметричну невизначеність і невизначеність класу моделі [1]. Параметрична невизначеність пов'язана з пошуком оптимальних параметрів моделі в межах (одного) класу моделі, в той час як невизначеність класу моделі (яка включає вибір і усереднення класу моделі) пов'язана з пошуком правдоподібності в наборі декількох конкуруючих класів моделі. Аналіз невизначеності класу моделі з використанням байєсівської структури призводить до компромісу між підгонкою моделі і її складністю. Використання оновленої моделі або набору класів моделей дозволяє здійснювати надійний прогноз реакції і продуктивності системи [1].

В контексті структурно-динамічних систем рекурсивні методи, такі як методи, засновані на фільтрі Калмана, дозволяють оцінювати структурний відгук і його невизначеність у міру появи вимірювань, процес, відомий як оцінка байєсівського стану. Хоча було показано [1], що байєсовські методи є ефективними інструментами для характеристики невизначеності моделювання (клас моделі і параметри моделі) і для оцінки динамічного відгуку конструкцій в

середовищі чисельного моделювання, їх застосування в експериментальних установках з використанням даних, отриманих з реальних (повномасштабних) структурних систем, повинні бути обмежені, за умови, що при моделюванні виникає невпевненість в тому, що, як правило, вони характеризують конструктивні особливості інженерних застосувань, що грають важливу роль в оцінці. Зокрема, було показано, що точність і успішне застосування поточних підходів до оцінки стану та відновлення моделі залежать від використаного класу моделі, і навіть ця оптимальна модель може бути не в змозі ефективно передбачити реакцію системи [1]. Це особливо відноситься до структур, що піддаються пошкодженням базових збуджень, де зазвичай спостерігаються значні відхилення від режимів нелінійного відгуку. До недавнього часу брак експериментальних даних з великомасштабних структурних систем був серйозною проблемою при перевірці методів МСК, особливо застосування при землетрусах. Щоб подолати це обмеження, останні проекти були зосереджені на експериментальному тестуванні великомасштабних структурних систем [1]. Такі експериментальні програми надають результати тестів для перевірки методів МСК в робочих умовах, які максимально схожі на ті, які спостерігаються на практиці, де невизначеність моделювання відіграє основну роль в ефективності методів оцінки структурної цілісності [1].

## **1.2 Теоретичні відомості про вібраційні вимірювання**

Споруди впродовж терміну експлуатації так чи інакше піддаватимуться дії вібрації.

Вібраційною установкою (віброустановкою) називається сукупність функціонально об'єднаних вібростендів, засобів завдань, управління, посилення, вимірювання, контролю та допоміжних пристроїв, що забезпечують відтворення вібрації з нормованими точносними характеристиками з випробувальними, перевірочними або іншими цілями [2].

Вібраційна випробувальна система складається з таких важливих компонентів як: вібратор, підсилювач, контролер та акселерометр [3].

Вібратор складається з таких елементів: котушка збудження та постійного магніту або електромагніту. Принцип роботи вібратора полягає в тому, що рух котушки відбувається в результаті взаємодії двох магнітних полів: змінного і постійного. Змінне магнітне поле наводиться струмом, що протікає по котушці. Постійне поле створюється постійним магнітом в невеликих вібраторах або електромагнітом в великих вібраторах. Обмотку електромагніту зазвичай називають обмоткою або котушкою збудження [3]. Штовхаюча сила, створювана вібратором, пропорційна силі струму в обмотці рухомої котушки, щільності магнітного потоку в повітряному зазорі магнітної системи і довжині обмотки котушки. Для визначення величини сили можна використовувати наступну формулу [3]:

$$F = B / L, \quad (1.1)$$

де:  $F$  - сила, Н;  $B$  - щільність магнітного потоку, Тл;  $I$  - струм, А;  $L$  - довжина, м.

Призначення підсилювача - підвести необхідну потужність до рухомої котушки вібратора у вигляді напруги і струму. Чим більше необхідна швидкість руху арматури, тим більша потрібна напруга. Чим більше необхідна сила або прискорення, тим більший потрібен струм.

Призначення контролера вібрації - стежити за тим, щоб сигнал, з акселерометра, відповідав сигналу, запрограмованому в контролері, іншими словами, навантаження зразка повинно відповідати заданим режимам випробувань. Режими випробувань вводяться в контролер оператором. Контролер порівнює вихідний сигнал акселерометра з табличним значенням і вносить корекцію, щоб сигнали дорівнювали один одному. Більшість контролерів вимірюють сигнал акселерометра в амплітудних або в середньоквадратичних значеннях, які перетворюються потім в амплітудні значення. Тобто, виконати точне управління важко не тільки через реакції сервосистеми, а й через те, що сигнал корекції помилки має спотворення [3].

Одним з найпоширеніших методів проведення випробувань є метод випробування синусоїдальним сигналом [3]. При цих випробуваннях сигнал

управління вібратором має форму синусоїди, частота якої змінюється з часом. Рівень або амплітуда сигналу може здаватися у вигляді прискорення, швидкості або переміщення. Зазвичай застосовуються акселерометри, вихідний сигнал яких пропорційний прискоренню. Контролер може перетворювати сигнал акселерометра в швидкість (інтегруванням) або в переміщення (подвійним інтегруванням).

Так як рух відбувається за гармонічним законом, то переміщення, швидкість і прискорення також змінюються за гармонічним законом. Однак ці характеристики не синфазні: наприклад, якщо переміщення досягає максимуму, у швидкості не максимальне значення. Фазове співвідношення між переміщенням, швидкістю і прискоренням таке, що різниця фази між швидкістю і прискоренням дорівнює  $90^\circ$ , між переміщенням і прискоренням -  $180^\circ$ . Тому, коли переміщення максимальне, швидкість мінімальна, прискорення максимальне [3].

При роботі в вертикальному положенні вібратор створює штовхаюче зусилля, спрямоване вертикально. Згідно з третім законом Ньютона кожна дія викликає протидію. З цього випливає, що прикладаючи силу до нашого об'єкту випробувань, ми впливаємо такою ж силою на підлогу. Так як більшість будівель мають власну частоту близько 15 Гц [3], то збуджуються резонансні частоти не тільки предметів, що оточують вібратор, а й резонансні частоти будівлі, а це, в деяких випадках, може призвести до пошкодження будівлі. Щоб така проблема не виникла, можна застосувати сейсмічну масу – зазвичай великий бетонний блок, вага якого повинна бути не менше, ніж в 10 разів більше максимальної штовхаючої сили, що розвивається вібратором, або використовувати деякі інші методи ізоляції, такі як пневматичні опори, або опори з гуми [3].

### **1.3 Системи для перевірки споруд на сейсміку**

Призначення вібраційної системи полягає в створенні певних і відтворюваних механічних коливань, передачі їх об'єкту випробувань, а також в імітації реальних умов вібрації, створенні змінних напружень в об'єкті випробувань для виявлення прихованих дефектів, вивченні властивостей

випробуваної конструкції. Тому генератор коливань (вібратор) повинен забезпечувати рух тільки в одному напрямку з малими спотвореннями і мати переміщення, швидкість і прискорення, які забезпечують виконання більшої частини вимог з проведення випробувань в межах створюваної штовхаючої сили [3].

При визначенні параметрів вібраційної випробувальної системи необхідно знати такі параметри:

1. Параметри корисного навантаження:
  - Масу
  - Форму
  - Розміри
  - Положення центра ваги (статичну та динамічну)
  - Масу оснащення
2. Режими випробувань:
  - Синусоїдальна вібрація
  - Синусоїдальна вібрація з ковзаючою частотою
  - Випадкова вібрація
  - Ударне навантаження
  - Синусоїдальна вібрація, накладена на випадкову
  - Ударний спектр

Також необхідно знати такі додаткові вимоги: потужність системи, основні характеристики (переміщення, швидкість і частотний діапазон), статична вантажопідйомність, експлуатаційні умови, умови застосування.

В ідеалі можливості системи повинні бути вищі на 20-30%, ніж це необхідно [3].

Розглянемо особливості вимірювання різних типів вібрації.

### **1.3.1. Синусоїдальна вібрація**

Пікова синусоїдальна сила вимірюється за допомогою нормованого корисного навантаження. Маса навантаження зазвичай в два рази перевищує

масу арматури. Для великих вібростендів більш важкі навантаження використовуються для визначення здатності напрямних арматури і пневматичної підвіски сприймати перекидаючий момент при зміщенні центру ваги навантаження [3].

У деяких системах застосовується узгоджувальний трансформатор для отримання оптимальних параметрів при синусоїдальній і випадковій вібрації. У режимі синусоїдальної вібрації вихідна напруга підсилювача потужності вибирається таким чином, щоб забезпечити максимальне штовхаюче зусилля. При необхідності отримання більш високих швидкостей в якості джерела змінної напруги використовується узгоджувальний трансформатор. При збільшенні напруги, що підводиться до вібратора, швидкість можна пропорційно збільшити, але при цьому штовхаючу силу необхідно пропорційно зменшити. Системи з узгоджувальним трансформатором іноді мають переміщення менше, ніж максимально можливе для даного вібратора. Це пояснюється тим, що на низьких частотах трансформатор обмежує рівень напруги, що підводиться до вібратора [3].

Пряме з'єднання підсилювача вібратора в даний час виконується для широкого кола систем, при цьому забезпечується повне переміщення на найнижчих частотах. Однак, зазвичай частотну характеристику підсилювача штучно обмежують в області низьких частот, щоб виключити появу небажаної постійної складової в керуючому сигналі. З цієї причини характеристики систем з прямим з'єднанням не нормуються на частотах нижче 5 Гц. Просте рішення дозволяє розширити частотний діапазон систем з прямим з'єднанням до 1 Гц і навіть нижче. Деякі розробки підсилювачів потужності є підсилювачами постійного струму і мають вбудовану систему підтримки нульового положення столу вібратора [3].

Верхня гранична частота більшості вібраційних систем визначається вібратором. З достатньою для практики точністю частотний діапазон для максимальної штовхаючої сили визначається як частота основного резонансу арматури, помножена на коефіцієнт 1,3 [3]. Це справедливо для навантажень з

малою масою. При більш важких навантаженнях, для кріплення яких використовується додаткове оснащення, верхня частота визначається головним чином конструкцією цього оснащення.

Величини прискорень (максимальні, синусоїдальні), що приводяться в таблицях, є максимальними допустимими рівнями для системи без навантаження на столі вібратора. Ці обмеження визначаються наступними причинами [3]:

1. Максимальним допустимим рівнем для окремо взятого вібратора системи. Цей рівень зазвичай дорівнює 100 g ампл. (але може бути і нижче) і [3], як правило, не забезпечує досягнення максимальної продуктивності системи.
2. Максимальним допустимим рівнем системи по штовхаючій силі. Це відноситься зазвичай до систем, у яких підсилювач потужності не забезпечує досягнення максимальної штовхаючої сили вібратора.

В обох випадках неможливо досягти максимального пікового рівня прискорення у всьому частотному діапазоні системи при невеликому навантаженні або без нього через те, що підсилювач потужності не зможе забезпечити необхідну вихідну напругу на частотах, що лежать безпосередньо перед частотою основного резонансу арматури вібратора [3].

### **1.3.2. Випадкова вібрація**

Параметри випадкової вібрації визначені стандартом ISO 5344 [4]. Параметри штовхаючої сили засновані на нормованому спектрі в діапазоні 20-2000 Гц і відношення пікового значення прискорення до середньоквадратичного значення не менш, ніж 3 : 1.

Важливо, щоб параметри систем визначалися стандартом ISO 5344 і щоб підсилювачі потужності могли віддавати в навантаження піковий струм хоча б в три рази більше середньоквадратичного значення для синусоїдального сигналу. Якщо пікове значення струму не задовольняє цій умові, або в сигналі напруги присутні значні спотворення, то в спектрі потужності сигналу прискорення з'являться небажані гармоніки, які можуть призвести до пошкодження об'єкта випробувань [3].



Створювана вібратором сила є функцією як спектральної щільності прискорення (форми спектра прискорення), так і динамічної реакції навантаження (яка може не відповідати реакції чисто масового навантаження). Так як більшість реальних навантажень мають жорстке з'єднання з вібратором тільки в нижній частині частотного діапазону, то отримане середньоквадратичне прискорення може бути вище за прискорення для чисто масових навантажень.

У деяких випадках, якщо форма спектральної щільності прискорення, що застосовується при випробуваннях, відрізняється від форми спектра, визначеного виробником, середньоквадратичне випадкове прискорення (штовхаюча сила), що створюється вібратором, може бути меншим необхідного прискорення (штовхаючої сили), розрахованого для чисто масового навантаження [3].

Для частотних діапазонів, відмінних від діапазону 20-2000 Гц, можуть знадобитися деякі коригування параметрів. У загальному випадку для форм спектрів з верхньої частотою менше 1000 Гц повинна бути відкоригована величина випадкової сили. Конкретні зміни будуть залежати від характеристик вібратора і частотного діапазону. Якщо випробування проводяться в вузько-смуговому діапазоні, ми можемо заздалегідь визначити [3] продуктивність системи для будь-якого заданого випадкового профілю. У деяких випадках при використанні трансформатора коригування параметрів випадкової вібрації можна звести до мінімуму, якщо використовувати відведення вторинної обмотки, призначеної для синусоїдального режиму.

### **1.3.3. Ударне навантаження**

Параметри ударного процесу визначені [3] з урахуванням того, що ударним імпульсом є півхвиля синусоїди. Параметри системи узагальнені в специфікації системи, в якій визначені наступні обмеження:

1. Пікове значення штовхаючої сили системи.
2. Рівень пікового прискорення.
3. Рівень пікової швидкості.

4. Межі пікового прискорення і тривалості імпульсу.
5. Рівні початкового (передімпульсного) і кінцевого (післяімпульсного) прискорення, які не перевищують 10% від заданого ударного рівня.

У більшості випадків для даної системи пікове значення штовхаючої сили приблизно таке ж, як і для синусоїдального режиму. Пікове значення швидкості також приблизно дорівнює значенню швидкості для синусоїдального режиму [3]. З цього випливає, що пікове значення сили (струму) і швидкості (напруги) можна змінювати тільки перемиканням обмоток трансформатора, якщо такі є.

Пікове значення сили, що розвивається вібратором при ударі, може в два рази перевищувати пікове значення для синусоїдального режиму за умови, що підсилювач має достатньо потужності, щоб забезпечити необхідні струм (силу) і напругу (швидкість) для даної форми ударного імпульсу. Оптимізувати параметри імпульсу сили для даної форми ударного імпульсу при відсутності вимоги забезпечення високої швидкості можна також за допомогою вибору вторинних обмоток трансформатора.

Щоб будь-який вібратор міг забезпечити штовхаючу силу при ударі в два рази більше, ніж при синусоїдальному режимі, зазвичай необхідний більш потужний підсилювач [3].

Якщо не потрібно збільшення швидкості при ударі, необхідно приблизно подвоїти потужність підсилювача, щоб отримати пікове значення сили ударного імпульсу в два рази більше, ніж пікове значення сили при синусоїдальному режимі.

Важливо відзначити, що рух тіла вібратора зростає зі збільшенням маси навантаження. Для більшості ударних випробувань можна заблокувати систему віброізоляції вібратора, щоб корпус вібратора жорстко кріпився до станини.

#### **1.4 Сейсмічні перетворювачі**

На сьогоднішній день чутливим елементом системи оцінки сейсмічної стійкості є сейсмоприймачі. Сейсмоприймач – це високочутливий вібровимірювальний перетворювач, який має рівномірну амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) в області низьких частот. Вони використовуються при

побудові сейсмічних локаторів для здійснення охоронної діяльності на територіях великих периметрів, для моніторингу сейсмічної активності, для захисту нафтогазових комунікацій, для проведення траєкторних випробувань. Також сейсмоприймачі знайшли своє застосування в системах діагностики і моніторингу технічного стану конструкцій, будинків, споруд і мостів. Застосування сейсмоприймачів в діагностичних комплексах, забезпечуючи безпеку стану трубопроводів, мостів, будівель і споруд, а також в системах моніторингу сейсмічної активності пред'являє високі вимоги до достовірності показань цих датчиків, оскільки від цього залежить надійність систем в цілому [5].

Для сейсмоприймачів основними параметрами, які визначаються при перевірці, є дійсне значення коефіцієнта перетворення на базовій частоті, нерівномірність АЧХ і нелінійність амплітудної характеристики. При визначенні нерівномірності АЧХ проводять вимірювання [5] коефіцієнта перетворення датчика в декількох точках частотного діапазону, при визначенні нелінійності АХ - в декількох точках амплітудного діапазону. Таким чином, основною дією при перевірці є визначення коефіцієнта перетворення, який розраховується як відношення напруги на виході сейсмодатчика до впливу на нього прискорення [5]:

$$K = U / A , \quad (1.2)$$

де:  $K$  – коефіцієнт перетворення сейсмоприймача,  $[мВ / (м * с^{-2})]$ ;  $U$  – напруга на виході сейсмоприймача,  $[мВ]$ ;  $A$  – прискорення, яке діє на сейсмоприймач,  $[м / с^2]$

Таким чином, точність визначення коефіцієнта перетворення залежить від точності вимірювання параметрів вібрації та відповідної напруги на виході сейсмоприймача [5].

Оскільки сейсмоприймачі є вібровимірювальними перетворювачами, визначення їх характеристик здійснюється за допомогою вібростенду. Сейсмоприймач встановлюється на вібростенд, який відтворює коливання заданої частоти і амплітуди. Параметри коливань контролюються еталонним

датчиком, за показаннями якого визначається відтворюване віброприскорення  $A$  [5].

При визначенні параметрів вібровимірювальних перетворювачів, як правило, застосовується відносний метод вимірювань, при якому в якості еталонного датчика використовується акселерометр, який встановлюється співвісно з вивіреном датчиком. Таким чином, на датчики впливає ідентичне прискорення, і показання еталонного акселерометра використовуються для визначення коефіцієнта перетворення вивіреного датчика за формулою (1.2).

Для кількісного опису вібрації обертового обладнання і в діагностичних цілях використовують такі вібраційні характеристики: віброприскорення, віброшвидкості і вібропереміщення.

Віброприскорення - це значення вібрації, прямо пов'язане з силою, що викликала вібрацію. Віброприскорення характеризує ту силову динамічну взаємодію елементів всередині агрегату, яка викликала дану вібрацію. Зазвичай відображається амплітудою - максимальне по модулю значення прискорення в сигналі [6]. Застосування віброприскорення теоретично ідеально, так як п'єзодатчик (акселерометр) вимірює саме прискорення і його не потрібно спеціально перетворювати. Недоліком є те, що для нього немає практичних розробок по нормам і граничним рівням, немає загальноприйнятого фізичного і спектрального тлумачення особливостей прояву віброприскорення. Успішно застосовується при діагностиці дефектів, що мають ударну природу - в підшипниках кочення, редукторах [6].

Віброшвидкість - це швидкість переміщення контрольованої точки обладнання під час її прецесії уздовж осі виміру [6]. На практиці вимірюється зазвичай не максимальне значення віброшвидкості, а її середньоквадратичне значення (СКЗ). Фізична суть параметра СКЗ віброшвидкості полягає в рівності енергетичного впливу на опори машини реальної вібрації і фіктивного постійного, чисельно рівного за величиною СКЗ. Використання значення СКЗ зумовлено ще й тим, що раніше вимірювання вібрації велися стрілочними

приладами, а вони всі за принципом дії є інтегруючими, і показують саме середньоквадратичне значення змінного сигналу [6].

З двох широко застосовуваних на практиці уявлень вібросигналів (віброшвидкість і вібропереміщення) краще використовувати віброшвидкість, так як це параметр, відразу враховує і переміщення контрольованої точки і енергетичний вплив на опори від сил, що викликали вібрацію. Інформативність вібропереміщення може зрівнятися з інформативністю віброшвидкості тільки за умови, коли додатково, крім розмаху коливань, будуть враховані частоти, як всього коливання, так і його окремих складових. На практиці зробити це досить проблематично.

Для вимірювання СКЗ віброшвидкості використовуються найпростіші прилади - віброметри. У більш складних приладах (віброаналізатор) також завжди присутній режим віброметра.

Вібропереміщення (віброзміщення, зміщення) показує максимальні межі переміщення контрольованої точки в процесі вібрації. Зазвичай відображається розмахом (подвійною амплітудою). Вібропереміщення - це відстань між крайніми точками переміщення елемента обертового обладнання уздовж осі виміру [6].

Незначні зміщення ґрунту, які відбуваються за рахунок приходу хвилі, відчуються сейсмоприймачем (СП), який перетворює механічні коливання ґрунту в електричну напругу [7].

СП класифікують в залежності від їх призначення та типу електромеханічного перетворювача. Розрізняють польові (наземні), свердловинні та морські СП [7]. В наземній та свердловинній сейсморозвідці застосовують СП з індукційними електромеханічними перетворювачами; в морській сейсморозвідці – переважно СП з п'єзоелектричними перетворювачами.

СП бувають електромагнітні, електродинамічні і п'єзоелектричні. У наш час найбільш широко використовуються електродинамічні СП різного типу [7]. Електродинамічні сейсмоприймачі в залежності від власних частот повинні

виготовлятися такими групами: Н – низькочастотні, С – середньочастотні, В – високочастотні. Також, СП повинні виготовлятися: двох класів – І та ІІ; трьох типів – СВ – вертикальний, СГ – горизонтальний, СК – комбінований. Основні параметри СП наведено в табл. 1.1 [8].

Таблиця 1.1. Основні параметри сейсмоприймача.

Найменування параметра	Клас	Значення параметра для груп		
		Н	В	С
Власна частота, Гц	І, ІІ	До 2	Св. 2 до 8	Св. 8
Показник перетворення, $B \times m^{-1} \times c \times Om^{-1/2}$ , не менше	І	6,00	3,00	1,50
	ІІ	3,00	1,50	0,75
Коефіцієнт нелінійних спотворень, % не більше	І	1,00	0,20	0,20
	ІІ	2,00	2,00	2,00
Ступінь загасання при відношенні опору катушки до опору шунта, що не перевищує 1, не менше	І, ІІ	0,50		
Маса перетворюючого блоку однієї (вертикальної, горизонтальної, похилої) компоненти, кг, не більше	І	1,500	0,400	0,100
	ІІ	2,000	0,500	0,125

### Висновок

Для вирішення завдань прогнозу землетрусів і оцінки сейсмічної небезпеки, підвищення якості моніторингу поточної сейсмічності і вирішення фундаментальних завдань сейсмології необхідно підвищити якість масових спостережень шляхом оснащення спостережних пунктів, станцій, обсерваторій приладами нового покоління. В першу чергу це стосується широкосмугових

сейсмічних датчиків, їх динамічного і частотного діапазонів. Мало які наявні вітчизняні моделі, розроблені і виготовлені до 1990-х років, справляються зі зростанням вимог [9].

За минулі роки оновилася елементна база електронних компонентів. З'явилися нові можливості вдосконалення конструкцій, в тому числі механічних елементів підвісу вертикального і горизонтального сейсмометрів. Тому необхідно проводити роботи з модернізації вже існуючих сейсмометрів та створенню нових.

Крім того, важливими є розробки системи реєстрації та візуалізації коливань. В умовах неперервного моніторингу будівель і споруд актуальним також є обробка інформації СП для виділення інформативних складових сигналу, які несуть інформацію про зміну впливів чи зміну сейсмічного стану споруди.

Всі ці розробки можуть стати основою для вдосконалення системи моніторингу сейсмічної стійкості споруд.

## РОЗДІЛ 2

### СЕЙСМІЧНИЙ ПРИЙМАЧ ВЕЛИКИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

#### 2.1 Загальна характеристика сейсмоприймача

Сейсмоприймачі (СП) - це електромеханічні пристрої, в яких енергія коливань ґрунту перетворюється на електричну, на основі використання принципу інертної маси [4].

Розглянемо СП великих переміщень типу ВБП – 3 [10].

Сейсмоприймач (віброграф) великих переміщень призначений для перетворення лінійних переміщень в електричні сигнали при потужних промислових вибухах або землетрусах [10], а також для вивчення коливань машин і механізмів з частотою 1 ... 100 Гц, що відповідає прискоренню 50g і амплітудою до 200 мм. Цей прилад розроблений в Інституті фізики Землі імені О. Ю. Шмідта. Сейсмоприймач працює в комплекті з осцилографом Н-700, що застосовуються як реєструючий прилад [10]. Технічні характеристики СП наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Технічні характеристики

Характеристика	Одиниці виміру	Значення
Кінематичні параметри реєстрації	м, м/с	зміщення, швидкість
Період власних коливань маятника	с	2
Приведена довжина маятника	м	1
Постійна загасання		0,7
Коефіцієнт перетворення	В м/с	0,065
Опір робочої котушки	Ом	40 – 48
Полоса пропускання	с	0,01 – 1
Динамічний діапазон зміщення	мм	1 – 200
Чутливість робочої котушки	В с/м	0,1
Габаритні розміри	мм	290 x180 x150
Маса	кг	9



Сейсмоприймач ВБП – 3 ( Рис. 2.1.) представляє собою одно маятниковий прилад з магнітоелектричним перетворювачем. Загальний вигляд СП наведено на рис. 2.1.

Основними складовими частинами сейсмоприймача є магнітна система, маятник з магнітоелектричним перетворювачем, котушка на каркасі 4 , яка виготовлена з електротехнічної міді, і основа 5 [10].

Магнітна система складається з підковоподібного постійного магніту 2 полюсним наконечником та осердям 1.

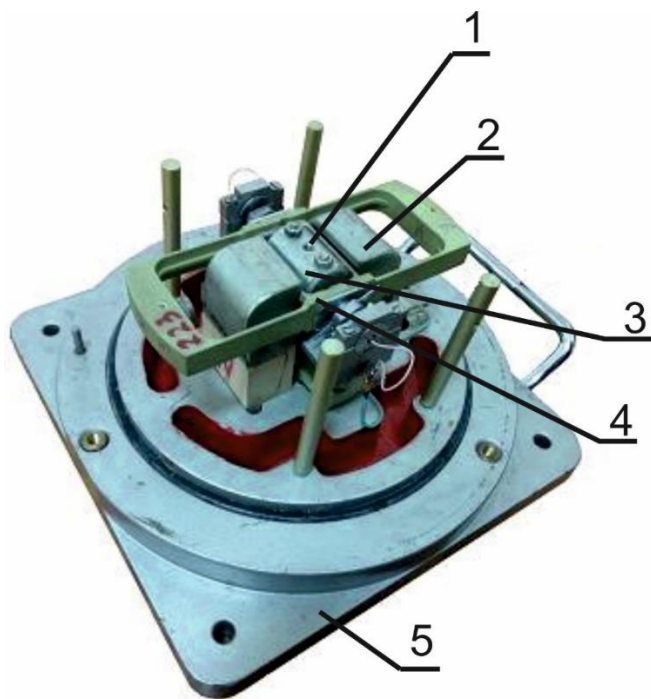


Рис. 2.1. Загальний вигляд ( з знятою кришкою)  
сейсмоприймача великих переміщень ВБП – 3

В повітряному зазорі між наконечником магніту і осердям утворюється рівномірне радіальне магнітне поле, в якому знаходиться каркас – демпфер з обмоткою котушки. Основа з магнітною системою кріпиться жорстко до об'єкту вимірювання коливань ( ґрунту, машини, споруди). Маятник в силу інерції прагне залишитися у спокої [10].

Таким чином, при виникненні відносного переміщення між котушкою і магнітом в котушці збуджується ЕРС.

Полярність ЕРС в котушці залежить від напрямку руху маятника та від напрямку силових ліній у маятнику.

При роботі з цим приладом особливу увагу необхідно приділяти стану шарикопідшипників, які підтримують піввісь маятника. Наявність тертя в підшипниках підвищує поріг чутливості приладу і впливає на його частотну характеристику.

Проводиться перевірка маятника на вільні коливання. Для цього маятник на підшипниках в обоймах на перевернутих накладках встановлюють на дві горизонтальні площини і відхиляють його на 90 градусів від положення рівноваги. Підраховують число повних коливань до повної зупинки. У підшипників задовільної якості число хитань не менше 70-80. Якщо підшипники не задовольняють цим вимогам, то їх слід добре промити. Для промивки послідовно використовується авіаційний бензин і спирт-ректифікат. Після рекомендується легко змастити підшипники [11].

Перевірка зовнішнього вигляду і технічний стан сейсмоприймачів проводиться шляхом їх огляду і випробування роботи окремих вузлів і деталей:

- Не відкриваючи кожуха, оглядають стан покриттів, цілість кабелю. Прилади до експлуатації повинні мати міцне покриття без осколків, тріщин та інших дефектів, що псує зовнішній вигляд. Прилади, що знаходяться в експлуатації і випущені з ремонту, можуть мати істотні пошкодження оздоблення кожуха.
- Зйомку захисного кожуха приладу можна проводити лише в сухому, вільному від пилу і залізних стружок приміщенні. Якщо прилад перенести безпосередньо з приміщення з низькою температурою, то для уникнення конденсації вологи на підшипниках через перепад температур, кожух знімається не раніше 2-3 годин після вирівнювання температур [11].
- Магнітна система повинна бути жорстко прикріплена до станини, а сердечник - до скоби. У повітряному зазорі магніту не має бути корозії і залізної тирси.
- Рамка маятника повинна знаходитися в горизонтальному положенні. Гвинти кріплення півосі до рамки маятника, обойми підшипників до скоби

і магнітні пружини до півосей повинні бути міцно затягнуті. На півосях і, особливо, в підшипниках не повинно бути корозії. При поштовхах маятник повинен плавно коливатися навколо положення рівноваги і мати невеликий (0,2-0,3 мм) поздовжній (вздовж осі) люфт.

- Гума, що забезпечує герметичність приладу, повинна зберегти м'якість.

Наявність провідності індукційної котушки визначається приладом Ц-435. При цьому маятник відхиляється від положення рівноваги. Відсутність замикання на корпусі визначається за допомогою включення на 1 хвилину мегометра Е6-3 (рис.2.2). Опір витoku повинен бути не менше 10 МОм [11].



Рис. 2.2. Вимірювальний пристрій Ц-435

Опір індукційної котушки вимірюється мостом Р-333, його чисельне значення має перебувати в межах 43-48 Ом [11].

Для виявлення якості підшипників на півосях встановлюється в спеціальне пристосування.

Маятник відводять від вертикального положення на  $90^\circ$  і, опустивши його, проводять підрахунок вільних коливань до повної його зупинки. Маятник повинен здійснювати не менше 80 коливань.

При визначенні періоду власних коливань маятник, що знаходиться в пристосуванні, відхиляють від положення рівноваги на кут  $5 \div 10^\circ$  та

секундоміром підраховують час послідовних коливань. Період власних коливань визначають за формулою [11]:

$$T_0 = \frac{t}{n}, \quad (2.1)$$

де  $T_0$  – період власних коливань, с;  $t$  – час послідовних коливань, с;  $n$  – кількість коливань.

(Примітка. Він повинен дорівнювати  $2 \text{ с} \pm 1\%$ ).

Для приведення періоду власних коливань маятника до величини  $2 \text{ с}$  з служить вантаж з гвинтом на одній стороні маятника (важкий кінець).

Наведена довжина маятника визначається за формулою:

$$l_0 = 0,248 * T_0^2, \quad (2.2)$$

Вона повинна знаходитися в межах  $1 \pm 2\%$  (м).

Для визначення постійної загасання коливань маятника до підстави зібраного приладу без кришки і магнітних балансирів кріплять в лещата так, щоб маятник встановився вертикально важким кінцем вниз. До важкого кінця маятника кріпиться вантаж масою  $M = 100$ . Котушка маятника підключається через шунтову коробку ШК до гальванометра осцилографа. Загрублення каналу має становити  $\approx 10 \div 20$ . Задавши маятнику поштовх, на фотопапері осцилографа записують його коливання.

На осцилограммі штангенциркулем заміряються послідовні розмахи коливань  $a_2 + a_3; a_3 + a_4; a_4 + a_5; a_5 + a_6$ .

Перша амплітуда  $a_1$  з визначення виключається.

$$\text{За формулами [11]: } v_1 = \frac{a_2 + a_3}{a_3 + a_4}; v_2 = \frac{a_3 + a_4}{a_4 + a_5}; v_3 = \frac{a_4 + a_5}{a_5 + a_6}; \quad (2.3)$$

$$\text{визначають середнє значення } V_{cp} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}.$$

Постійна загасання  $D$  маятника з вантажем визначається за формулою:

$$D = \frac{0,733 \lg V_{cp}}{\sqrt{1 + 0,537 (\lg V_{cp})^2}}, \quad (2.4)$$

Вона повинна знаходитися в межах  $0,6 - 0,8$ .

На осцилограмі по маркам часу вимірюється також час  $t$  послідовних  $n$  коливань. Період коливань  $T$  маятника з вантажем визначається за формулою:

$$T = \frac{t}{n}, \quad (2.5)$$

де  $T$  – період коливань маятника з вантажем;  $t$  – час вимірювання;  $n$  – кількість послідовних коливань.

Постійна загасання  $D_0$  (без вантажу) визначається за формулою:

$$D_0 = D^* \left( 1 + \frac{K}{K_0} \right) * \frac{T_0}{T}, \quad (2.6)$$

де  $D_0$  – постійна загасання маятника без вантажу;  $K$  – момент інерції додаткового вантажу  $M$ ;  $K_0$  – момент інерції маятника.

$K$  – момент інерції додаткового вантажу  $M$  щодо осі обертання маятника обчислюється за формулою [11]:

$$K = M \left( a^2 + al + \frac{r^2}{4} + \frac{l^2}{3} \right), \quad (2.7)$$

де  $a$  – відстань від осі обертання до верху вантажу;  $l$  – висота циліндричного вантажу;  $r$  – радіус вантажу;  $[K] = [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$ .

Момент інерції маятника  $K_0$  визначається за формулою:

$$K_0 = \frac{K - 0,25M \left( a + \frac{l}{2} \right)^2 \left( \frac{T}{T_0} \right)^2}{\left( \frac{T}{T_0} \right)^2 - 1}, \quad (2.8)$$

де  $M$  – маса вантажу.

Його значення може коливатися в межах  $(2,7 \div 3) \cdot 10^{-4} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$ .

Постійна згасання  $D_0$  маятника (без вантажу) повинна дорівнювати 0,6 - 0,8.

## **2.2 Опис стендів та методики досліджень сеймоприймачів**

З часом температурний, механічний, електричний та електронний стан будь-якого СП змінюються. Це відбувається через ті, чи інші фактори. Тому для цих приладів необхідно проводити попереднє інженерне дослідження працездатності та тестування їх технічного стану для виявлення часових змін та перевірки їх фізичних параметрів [12]. Для перевірки СП на кафедрі ПСОН розроблено спеціальні пристрої (стенди).

### **2.2.1. Пристрій для перевірки технічного стану сейсмодатчиків малих переміщень**

Пристрій розроблено для дослідження СП, які мають динамічний діапазон зміщень до  $\pm 10$  мм.

Основна ідея розробки цього пристрою – це об'єднання, в одній конструкції, вертикального та горизонтального переміщення рухомої платформи [12].

Платформа має досить великий розмір, що дозволяє розміщувати на ній одразу 2-3 СП.

Конструкція розробленого пристрою представлена на рис. 2.3 [12].

Основні елементи пристрою – рухома 1 і нерухома 2 платформи, які з'єднані між собою гнучкими пружними пластинами 3.

Технічні особливості пристрою полягають у тому, що поєднання горизонтальних і вертикальних переміщень рухомої платформи в одному пристрої досягається за рахунок використання симетричної конструкції розташування пружних елементів 3 та додаткових напрямних 4, в конструкції яких використовуються прецизійні шарикопідшипники. Останні необхідні для того, щоб забезпечити переміщення рухомої платформи тільки вздовж осі вимірювання [12].

Передбачена зміна власної частоти коливань пристрою. Регулювання частоти досягається двома методами [12]:

- за допомогою додаткових вантажів 5, які установлюють на рухому платформу і, таким чином, разом з СП змінюють загальну масу коливального тіла;

- зміною жорсткості пружних елементів 3; досягається за рахунок зміни конфігурації розташування пружних опорних елементів 6.

Таке регулювання дає змогу змінювати власну частоту коливань рухомої платформи в межах 0,1 – 10 Гц.

Маса датчика з додатковими вантажами – до 20 кг.

Для дослідження працездатності сейсмодатчиків, а також для виявлення можливих технічних порушень в роботі датчиків, використовується метод первинного збурення коливань і подальшого аналізу відгуків (згасаючих вихідних сигналів вимірювального каналу сейсмометра) на ці збурення [12].

Конструкція пристрою (рис. 2.3) забезпечує тестове первинне зміщення рухомої пластини відносно нерухомої у розмірі до 15 мм, як при горизонтальних так і вертикальних коливаннях. Величина первинного зміщення може бути змінена за допомогою регулюючого гвинта і вимірюється по переміщенню рухомого індексу відносно нерухомої шкали інструментальної лінійки.

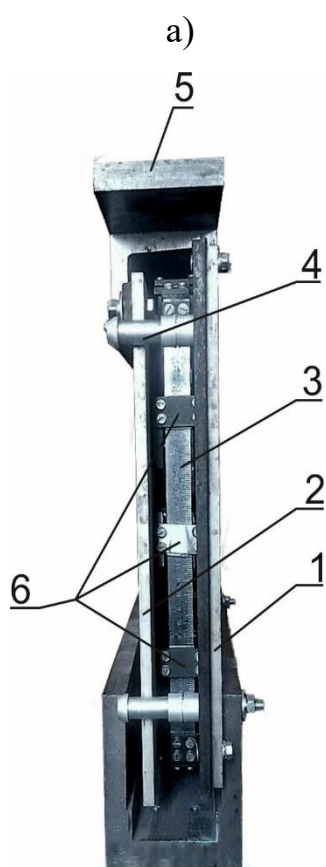
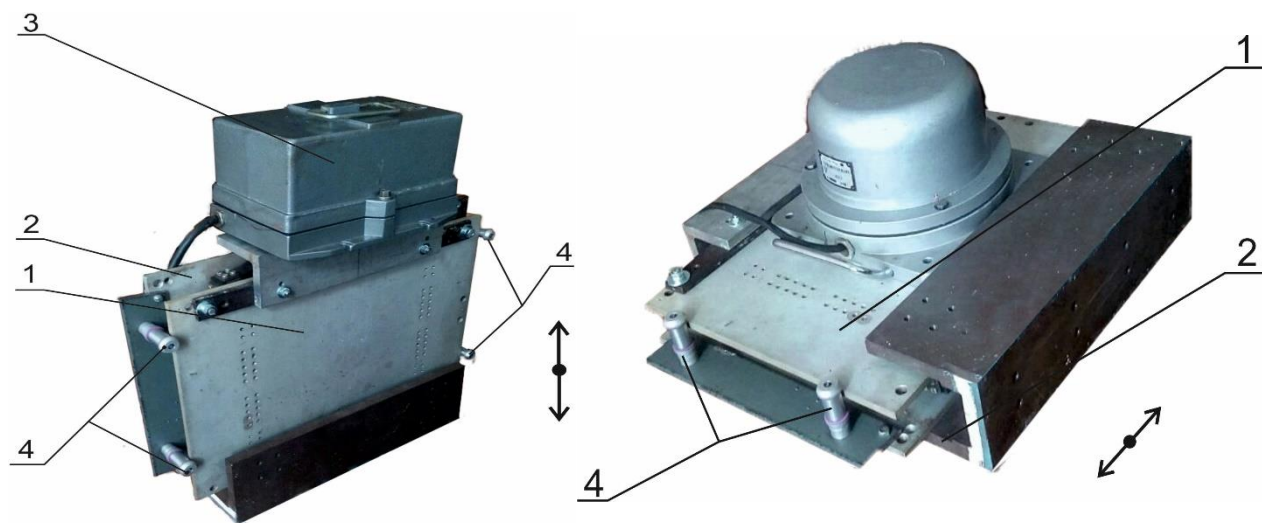
Рухома платформа пристрою разом з закріпленим на ній досліджуваним приладом після відхилення її і відпускання здійснює безперервні згасаючі коливання в горизонтальній або (в залежності від розташування) вертикальній площині, що дає змогу :

по-перше перевірити працездатність приладу, тобто присутність явних технічних порушень в роботі датчика ;

по-друге - візуально спостерігати і оцінювати на екрані осцилографа 8 (рис. 2.4, б):

- величину вихідного сигналу;
- характер загасання сигналу сейсмоприймача;
- власну і вимушену частоти коливань в системі датчик – об'єкт;
- інтенсивність шуму в вихідному сигналі;

по-третє - провести реєстрацію вихідного сигналу згідно схеми, представленій в наступному розділі [12].



в)

Рис. 2.3. Пристрій для перевірки технічного стану сейсмодатчиків малих переміщень:

а) у положенні дослідження вертикальних коливань;

б) у положенні дослідження горизонтальних коливань

в) конструкція пружних елементів підвісу



Дослідження доцільно проводити при різних частотах збурюючих коливань. Зміна частоти коливань пристрою здійснюється за допомогою встановлення додаткових вантажів.

### **2.2.2. Пристрій перевірки технічного стану сейсмоприймачів для вимірювання великих переміщень**

Пристрій розроблено для дослідження, в першу чергу сейсмоприймачів, які мають динамічний діапазон зміщень до  $\pm 200$  мм.

Технічні характеристики пристрою дослідження сейсмоприймачів великих переміщень наведені в табл.2.2 [12].

Таблиця 2.2 Технічні характеристики пристрою.

Характеристика	Одиниця виміру	Значення
Частотний діапазон	Гц	0,2 – 1,0
Динамічний діапазон зміщень точки кріплення сейсмоприймача	мм	до 200
Габаритні розміри пристрою	мм	5000 x 2000 x 400
Максимальна маса досліджуваних датчиків	кг	20

На рис. 2.4. а) представлено загальний вигляд пристрою для перевірки працездатності та тестування сейсмоприймачів великих переміщень.

Конструкція пристрою складається з двох основних елементів [12]:

- модуля формування поступального руху платформи для установки досліджуваних приладів;
- модуля формування обертального руху ведучої ланки пристрою для забезпечення широкого частотного діапазону коливань.

Механізм формування поступального руху (рис.2.4,а) складається з маятника 2, який обертається навколо осі 1, жорстко закріплений на нерухомій основі.

В нижній частині маятника розміщена платформа 4 (фактично представляє собою повзун), на якій закріплюється досліджуваний прилад 3.

Поступальний рух платформи 4 в горизонтальній площині забезпечується за допомогою використання кривошипно – шатунного механізму, який складається з кривошипу 6 (ведуча ланка) та шатуна 5.

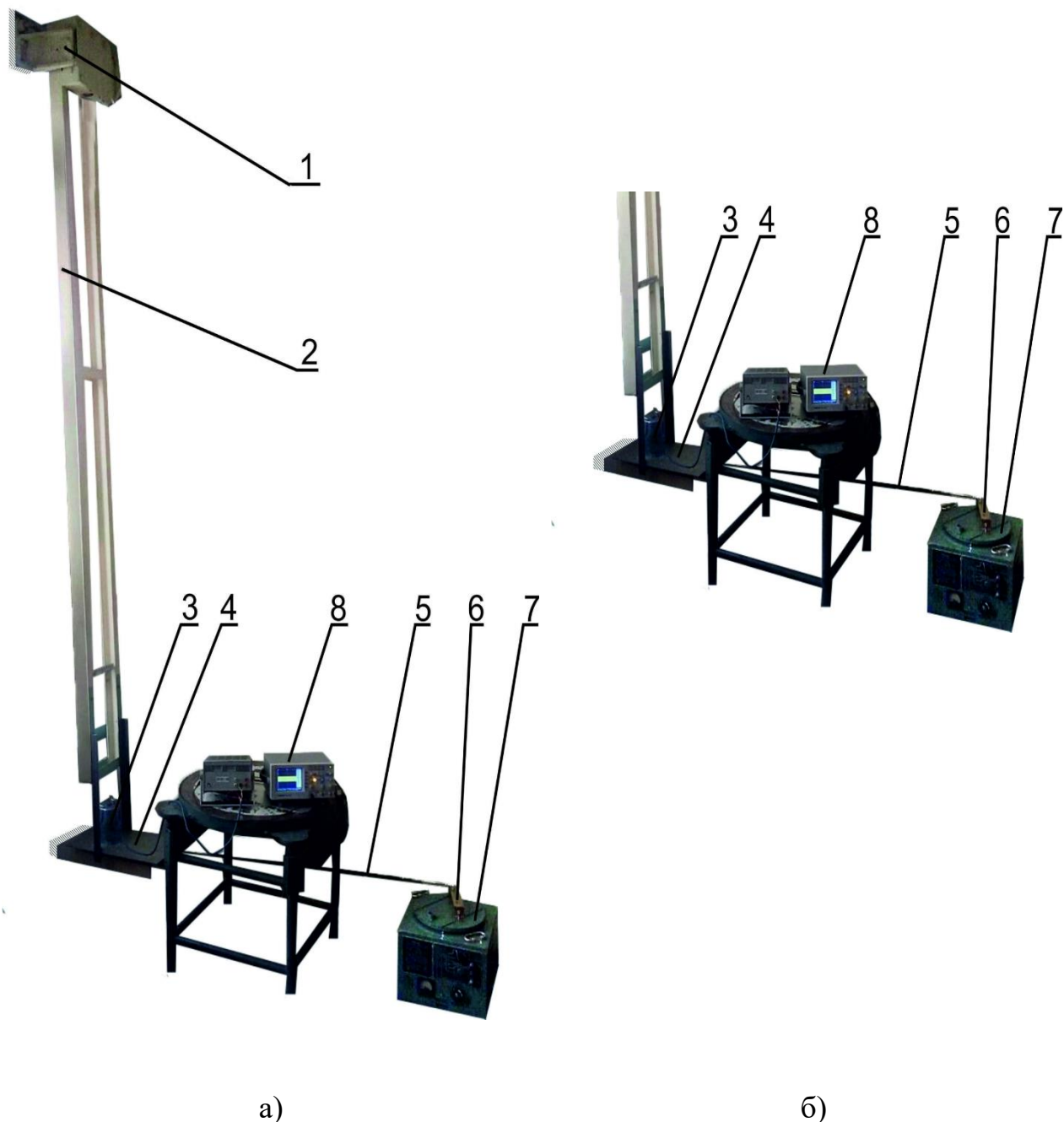


Рис. 2.4. Пристрій для перевірки технічного стану сейсмодатчиків великих переміщень: а) загальний вигляд пристрою; б) механізм формування незгасаючих коливань випробувального столу та вимірвальна апаратура

В якості привідного поворотного модуля використовується стандартний електромеханічний поворотний стіл УПГ – 56 (рис.2.4, б) з обертальною платформою 7, жорстко закріплений на основі. Характеристики поворотного стола такі, що він може забезпечувати коливання платформи в діапазоні частот 1 – 0,2 Гц [12].

Даний пристрій має досить просту конструкцію, яка забезпечує велику амплітуду коливань, а також здійснює електромеханічне керування рухом досліджуваного приладу в широкому діапазоні частот з найменшими габаритами і оптимальними параметрами потужності [12].

Для дослідження сейсмоприймачів великих переміщень використовується пристрій для формування незгасаючих горизонтальних гармонічних коливань з максимальною амплітудою до 150 мм (рис.2.4.). Частота коливань задається на УПГ – 56; її можна змінювати в широкому діапазоні від 1 до 0,2 Гц.

При перевірці працездатності сейсмоприймачів великих переміщень також необхідно візуально на екрані осцилографа спостерігати вихідний сигнал для оцінки його величини, амплітуди, частоти і наявності шуму [12].

Експериментальні дослідження СП ВБП – 3 були проведені на стенді великих переміщень. Для отримання сигналів задавалось зовнішнє збудження гармонічним сигналом з частотою 0,75 Гц (відгук СП зображено на рис. 2.5) та 1 Гц (сигнал СП зображено на рис. 2.6).

Для отримання сигналу з частотою 0,75 Гц було записано реалізацію довжини 10751 точок, що відповідає часу  $t \approx 10,7$  с. Частота опитування становить  $f_{оп} = 1000$  Гц. Далі було проведено статистичну обробку. Було знайдено середнє значення, дисперсію та середньоквадратичне відхилення відповідно за формулами:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.9)$$

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad (2.10)$$

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}, \quad (2.11)$$

де  $\bar{x}$  – середнє значення точок;  $N$  – кількість точок;  $x_i$  – значення  $i$ -тої точки;  $D_x$  – дисперсія;  $\sigma_x$  – середньоквадратичне відхилення. Отримано такі результати:  $\bar{x} = 5,3 \cdot 10^{-4}$ ,  $D_x = 7,9 \cdot 10^{-9}$ ,  $\sigma_x = 8,9 \cdot 10^{-5}$ .

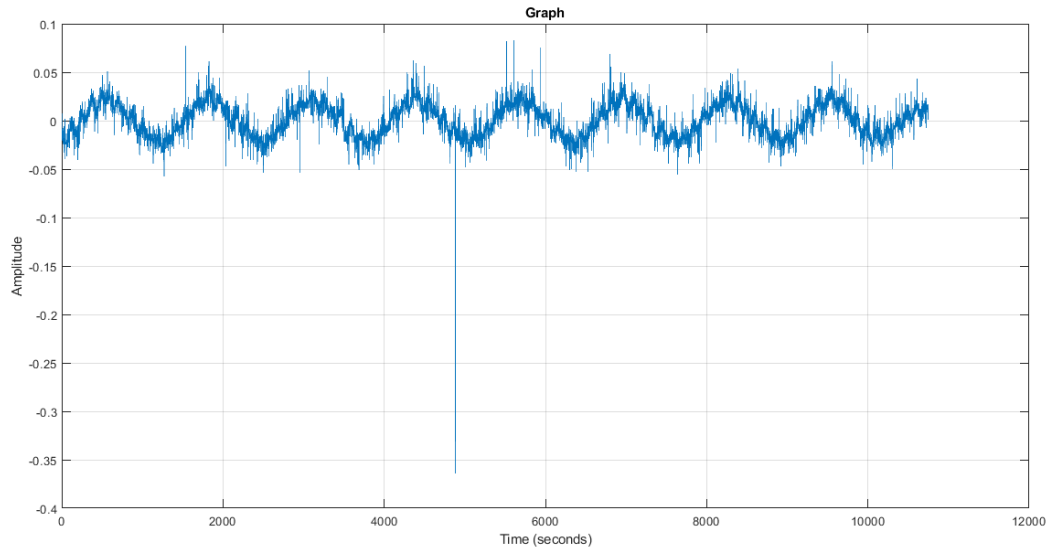


Рис. 2.5. Сигнал з сейсмотатчика ВБП-3 на стенді великих переміщень

Для отримання сигналу з частотою 1 Гц було записано реалізацію довжини 10751 точок, з чого встановлюємо час опитування  $t \approx 10,7$  с. З сейсмограми видно, що вимушені коливання тривають приблизно 7 с, а далі йде шум. Частота опитування становить  $f_{on} = 1000$  Гц.

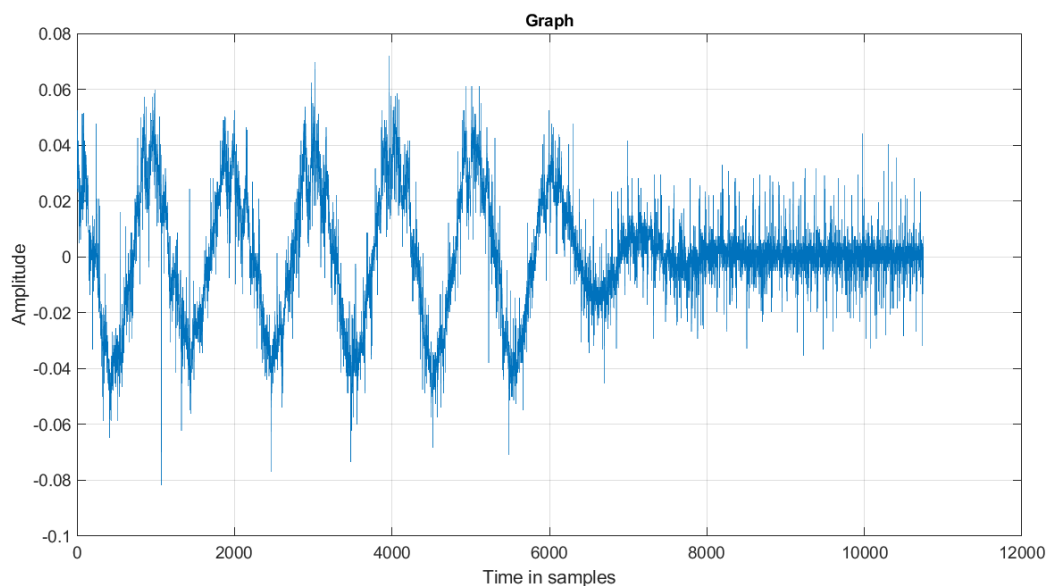


Рис. 2.6. Сигнал з сейсмотатчика ВБП – 3 на стенді великих переміщень

При статистичній обробці були отримані такі результати:  $\bar{x} = 2,9 \cdot 10^{-4}$ ,  $D_x = 4,6 \cdot 10^{-9}$ ,  $\sigma_x = 6,8 \cdot 10^{-5}$ .

Також були проведені експериментальні дослідження СП ВБП - 3 на стенді малих переміщень. Вони зображені на рисунках, які наведені далі.

На рис. 2.7 показаний приклад часової реалізації сигналу СП. Випробування проведено в режимі вертикальних коливань при ударному збуренні вібраційного стенду. Кількість точок становить 8224, частота опитування  $f_{on} = 1000$  Гц, час опитування становить  $t = 8$  с. За результатами статистичної обробки було отримано:  $\bar{x} = 7,99 \cdot 10^{-5}$ ,  $D_x = 0,0015$ ,  $\sigma_x = 0,0386$ .

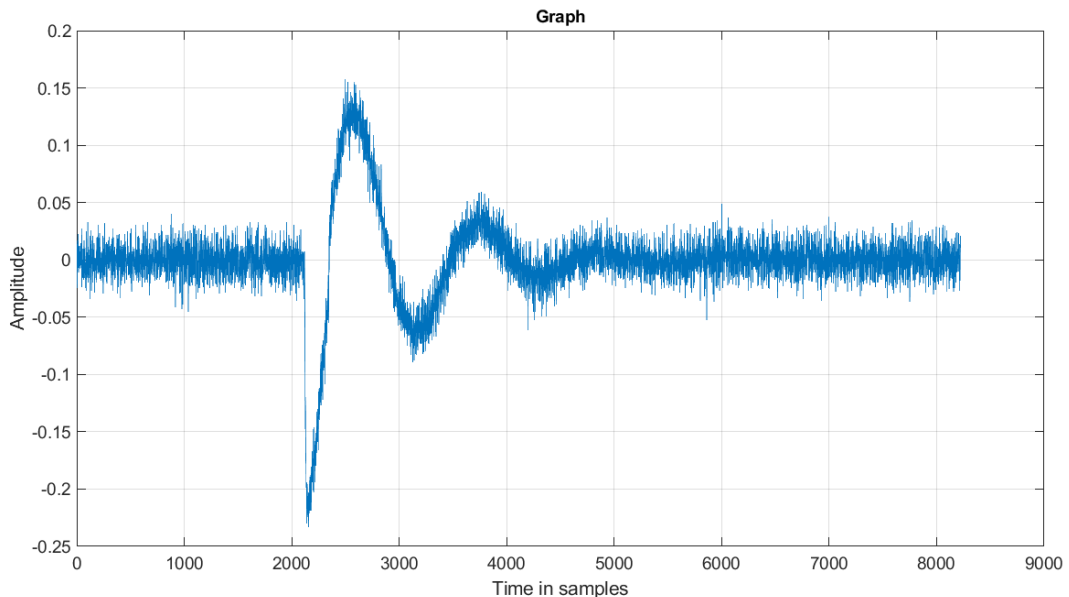


Рис. 2.7. Приклад реалізації СП при ударному збуренні місця встановлення

Приклад реалізації сигналу сейсмічного приймача при нерегулярному ударному збуренні наведено на рис. 2.8, частота опитування  $f_{on} = 1000$  Гц, кількість точок  $n = 30719$ , що відповідає часу опитування  $t = 30,7$  с. Випробування проведено в режимі вертикальних коливань при ударному збуренні вібраційного стенду.

За результатами статистичної обробки було отримано:  $\bar{x} = 3,4 \cdot 10^{-5}$ ,  $D_x = 7,65 \cdot 10^{-10}$ ,  $\sigma_x = 2,77 \cdot 10^{-5}$ .

На рис. 2.9 показана часова реалізація сигналу при складному збуренні місця встановлення. На отримані сейсмограмі бачимо складні коливання. Для

отримання цього сигналу проводились динамічні нерегулярні збудження. Всього було записано 10239 точок, тому час опитування становить  $t = 30,7$  с, частота опитування  $f_{on} = 1000$  Гц. За результатами статистичної обробки було отримано:  $\bar{x} = 5,61 \cdot 10^{-4}$ ,  $D_x = 3,45 \cdot 10^{-10}$ ,  $\sigma_x = 1,86 \cdot 10^{-5}$ .

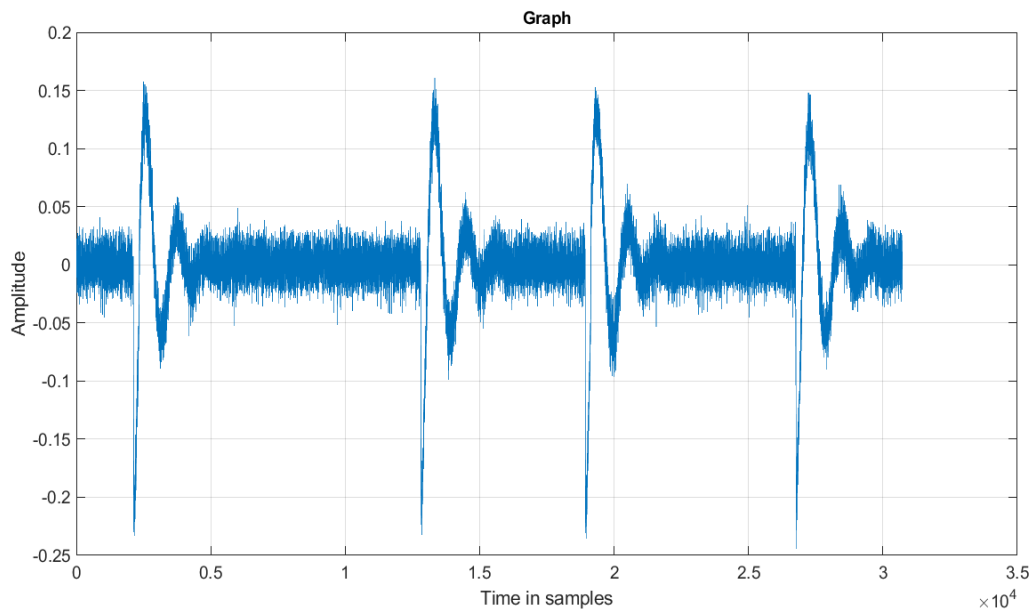


Рис. 2.8. Приклад реалізації сигналу СП при ударному збуренні місця встановлення

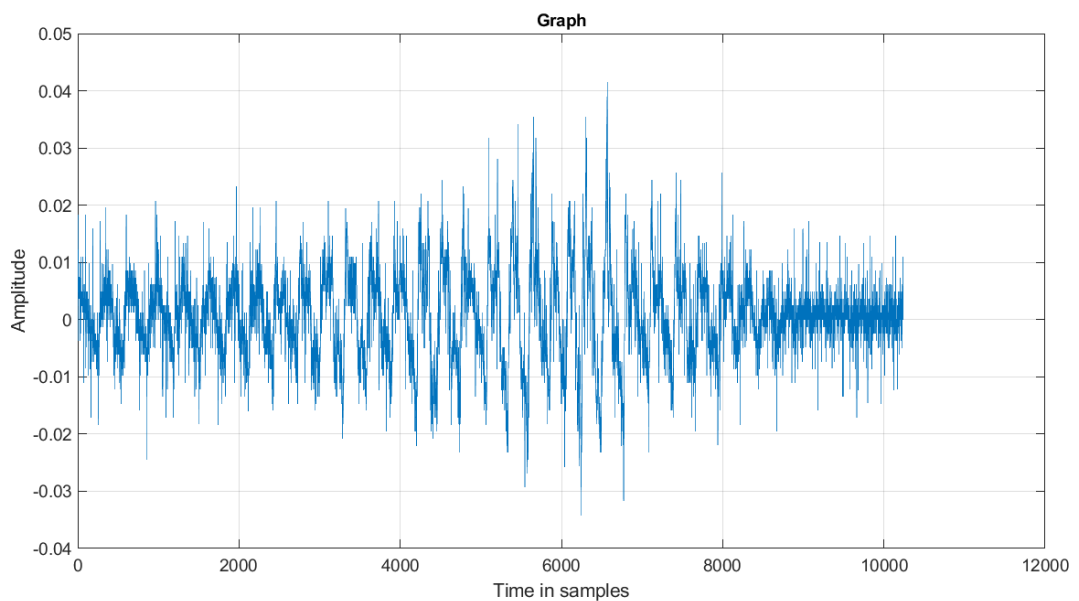


Рис. 2.9. Сигнал з сейсмотатчика ВБП – 3 на стенді малих переміщень

На рис. 2.10 наведено приклад часової реалізації (вибірки) сигналу, який знімається з сейсмодатчика, коли СП був прикріплений до стенду зі зміщенням рухомої пластини до 15 мм. Цю пластину відхиляли і відпускали, таким чином вона здійснює неперервні згасаючі коливання у вертикальній площині. Запуск на вібростенді проводився з частотою 5,65 Гц. Було записано 10239 точок, тому час опитування становить  $t = 10,2$  с, частота опитування  $f_{on} = 1000$  Гц. За результатами статистичної обробки було отримано:  $\bar{x} = 5,24 \cdot 10^{-4}$ ,  $D_x = 3,6 \cdot 10^{-10}$ ,  $\sigma_x = 1,9 \cdot 10^{-5}$ .

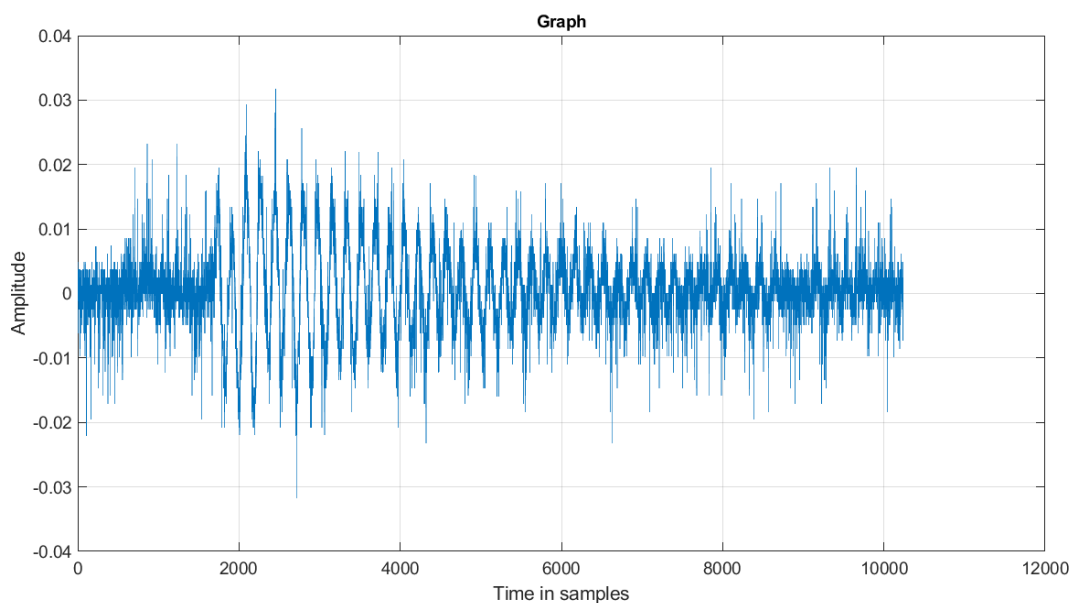


Рис. 2.10. Сигнал з сейсмодатчика ВБП – 3 у положенні дослідження вертикальних коливань

На рис. 2.11. показаний приклад реалізації сигналу СП ВБП – 3 на стенді малих переміщень при інтенсивному збуренні. Всього записано точок 60415, тому час опитування становить  $t = 60,4$  с, частота опитування  $f_{on} = 1000$  Гц. За результатами статистичної обробки було отримано:  $\bar{x} = 5,66 \cdot 10^{-4}$ ,  $D_x = 7,6 \cdot 10^{-10}$ ,  $\sigma_x = 2,7 \cdot 10^{-5}$ .

На рис. 2.12 показана часова реалізація сигналу. Всього записано точок 20479, тому час опитування становить  $t = 20,4$  с, частота опитування  $f_{on} = 1000$  Гц. За результатами статистичної обробки було отримано:  $\bar{x} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ ,  $D_x = 2,29 \cdot 10^{-11}$ ,  $\sigma_x = 4,78 \cdot 10^{-6}$ .

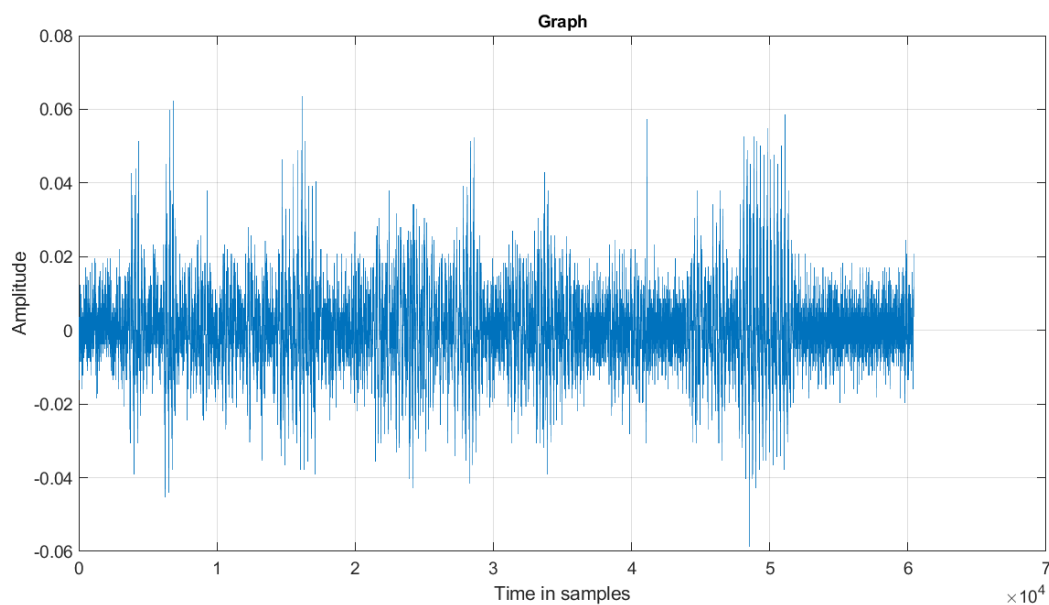


Рис. 2.11. Сигнал з сейсмодатчика ВБП – 3 на стенді малих переміщень

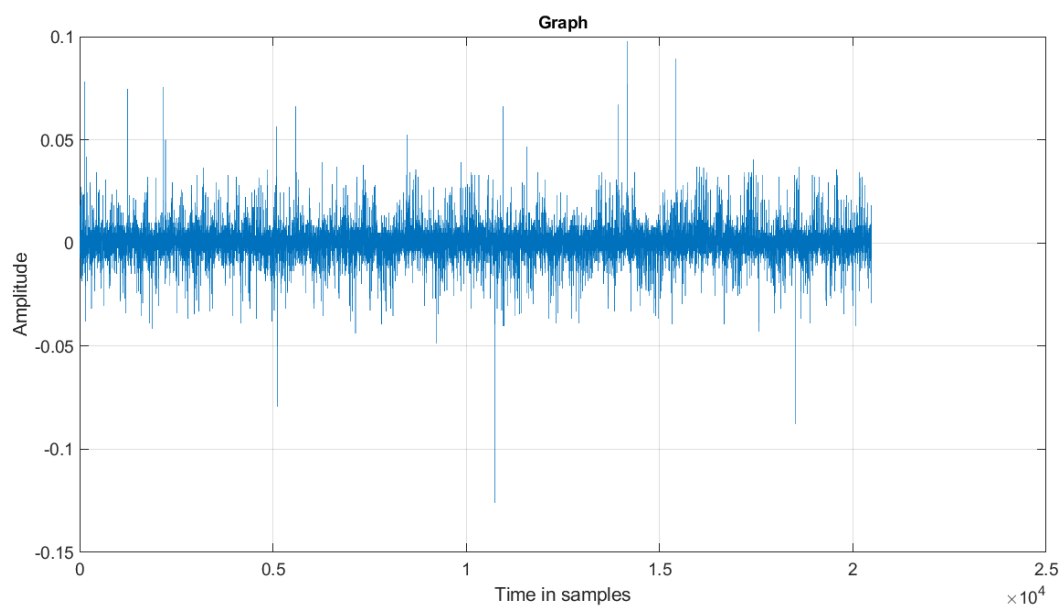


Рис. 2.12. Сигнал з сейсмодатчика ВБП – 3 на стенді малих переміщень



## РОЗДІЛ 3

### ОБРОБКА СИГНАЛІВ СЕЙСМІЧНОГО ПРИЙМАЧА ПРИ ДИНАМІЧНИХ ЗБУРЕННЯХ

#### 3.1. Методи обробки інформації

##### 3.1.1. Спектральний аналіз

У нас є файл з даними сигналу. Відомо, що сигнал представляє собою суму синусоїд з власними частотами, амплітудами та початковими фазами, а також, можливо, білий шум. Для того, щоб визначити кількість гармонік в складі сигналу, наявність білого шуму, наявність постійної складової сигналу необхідно використовувати спектральний аналіз.

Французький математик Жан Батист Жозеф Фур'є показав, що будь-яку періодичну функцію, яка задовольняє деяким умовам (неперервність у часі, періодичність, задовільність умовам Діріхле) можна розкласти в ряд, який отримав назву – ряд Фур'є [13].

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t + \theta_k\right), \quad (3.1)$$

де  $A_k$  – амплітуда  $k$  – го гармонічного коливання;  $k \frac{2\pi}{\tau} = k\omega$  – кругова частота гармонічного  $k$  – го коливання;  $\theta_k$  – початкова фаза  $k$  – го коливання.

В інженерній практиці розклад періодичних функцій в ряд Фур'є широко застосовується, наприклад, в задачах теорії ланцюгів: періодичний вхідний вплив розкладають на суму синусоїдальних та розраховують необхідні параметри ланцюгів.

Розклад в ряд Фур'є дозволяє розкласти неперервну функцію на суму інших неперервних функцій. Та в загальному випадку, ряд буде мати безкінечну кількість членів [13].

Подальшим удосконаленням підходу Фур'є є інтегральне перетворення його ж імені. Перетворення Фур'є.

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-it\omega} dt, \quad (3.2)$$

де  $\omega$  – поточна частота аналізу.

На відміну від ряду Фур'є, перетворення Фур'є розкладає функцію не по дискретними частотами (набір частот ряду Фур'є, за якими відбувається розкладання - дискретний), а по неперервним.

Відношення коефіцієнтів ряду Фур'є та результат перетворення Фур'є називають спектром.

Спектр перетворення Фур'є - в загальному випадку, функція комплексна, що описує комплексні амплітуди відповідних гармонік. Тобто, значення спектра - це комплексні числа, чий модуль є амплітудами відповідних частот, а аргументи - відповідними початковими фазами. На практиці, розглядають окремо амплітудний спектр і фазовий спектр [13].

Коефіцієнти ряду Фур'є є ні чим іншим, як значеннями перетворення Фур'є в дискретні моменти часу. Перетворення Фур'є зіставляє безперервний в часі, нескінченний функції іншу, безперервну з частотою, нескінченну функцію - спектр.

Дискретне перетворення Фур'є покликане вирішити проблему необхідності неперервності і нескінченності в часі сигналу. По суті, ми вважаємо, що вирізали якусь частину нескінченного сигналу, а у всій іншій тимчасовій області вважаємо цей сигнал нульовим [13].

Математично це означає, що, маючи досліджувану нескінченну в часі функцію  $f(t)$ , ми множимо її на деяку віконну функцію  $w(t)$ , яка наближається до нуля всюди, крім інтервалу часу, який нас цікавить.

Якщо «виходом» класичного перетворення Фур'є є спектр - функція, то «виходом» дискретного перетворення Фур'є є дискретний спектр. І на вхід теж подаються відліки дискретного сигналу [13].

### **3.1.2. Вейвлет – аналіз**

Широкого поширення набули методи аналізу сигналів, що ґрунтується на масштабно - часових перетвореннях, зокрема, Вейвлет – перетворення (ВП) [14]. Це обумовлено основними властивостями ВП, які забезпечують можливість одночасно аналізувати та оцінювати параметри швидкоплинних процесів та

повільно змінюваних сигналів, що є важливим для обробки локально чи суттєво нестационарних сигналів [14].

Вейвлет – це хвильова функція з нульовим середнім значенням, що обмеженою у часовому та частотному поданнях. ВП використовує нерегулярні та загалом несиметричні хвильові функції [14].

Неперервне ВП визначається як згортка сигналу  $x(t)$ , що аналізується, та деякої вейвлет – функції  $\psi_{a,b}$ , яку отримують шляхом розтягу – стиску та часового зсуву базової хвильової функції [14]:

$$W_{\psi}x(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (3.3)$$

де  $a$  – показник масштабу, зменшення якого визначає стиснення вейвлет – функції, а збільшення – розтяг вейвлет – функції;  $b$  – показник зсуву базової вейвлет – функції за часовою віссю;  $*$  - знак комплексного спряження.

Дискретне ВП визначається для параметрів масштабу та зсуву з основою 2, тобто для  $a = 2^j$  та  $b = n2^j$ , за наступним виразом [14]:

$$W(2^j, n2^j) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_k \psi^* \left( \frac{k}{2^j} - n \right) x(k), \quad (3.4)$$

де  $j$  – номер рівня розкладання, який визначає протяжність базового вейвлету на часовій осі.

В процесі перетворення відбувається розкладання сигналу, що аналізується, в ієрархічний набір апроксимацій  $a_j$ , які отримані для великих значень параметру масштабу та характеризують повільні змінювання сигналу, та деталей  $d_j$ , що отримані для малих значень параметру масштабу та характеризують високочастотні складові сигналу. Таким чином, вимірювальний сигнал  $x(t)$  в результаті ВП набуває подання у вигляді такої суми [14]:

$$x(t) = x_{j_m}^a(t) + \sum_{j=1}^{j_m} x_j^d(t), \quad (3.5)$$

де  $j_m$  визначає рівень розподілу з найбільш грубим часовим розділенням, а перехід до апроксимації на попередньому рівні ( $j_{m-1}$ ) відбувається шляхом додавання апроксимацій та деталей на рівні  $j_m$ .

### 3.2. Результати обробки сигналів

Для кожного сигналу була проведена спектральна обробка. Також для більш детального аналізу було виконано вейвлет – розкладання, а після цього для кожного елементу цього розкладання було проведено ще раз спектральну обробку.

На рис. 3.1 показаний спектр сигналу, що зображений на рис. 2.5. Спектр показаний в інтервалі частот до 10 Гц. Інтервал частот до 2 Гц можна вважати інтервалом суттєвих частот, поза межами якого спектральна щільність є характеристикою шуму.

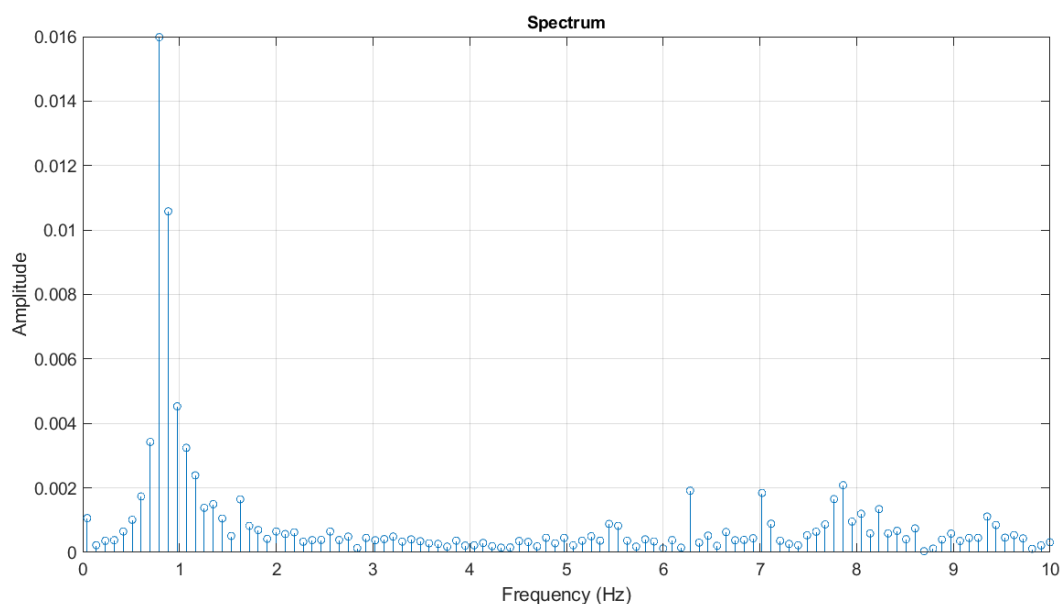


Рис. 3.1. Спектральна щільність сигналу сейсмічного приймача

Для більш детального аналізу сигналу було виконано вейвлет-розкладання сигналу, зображено на рис. 3.2. Сигнал був розкладений на 7 рівнів з використанням хвильової функції сімейства Добеші db2. Та для кожного з отриманих елементів розкладання було проведено спектральну обробку,

показано на рис. 3.3. Для останньої апроксимації було пораховано середнє значення  $\bar{x} = 5,54 \cdot 10^{-4}$ .

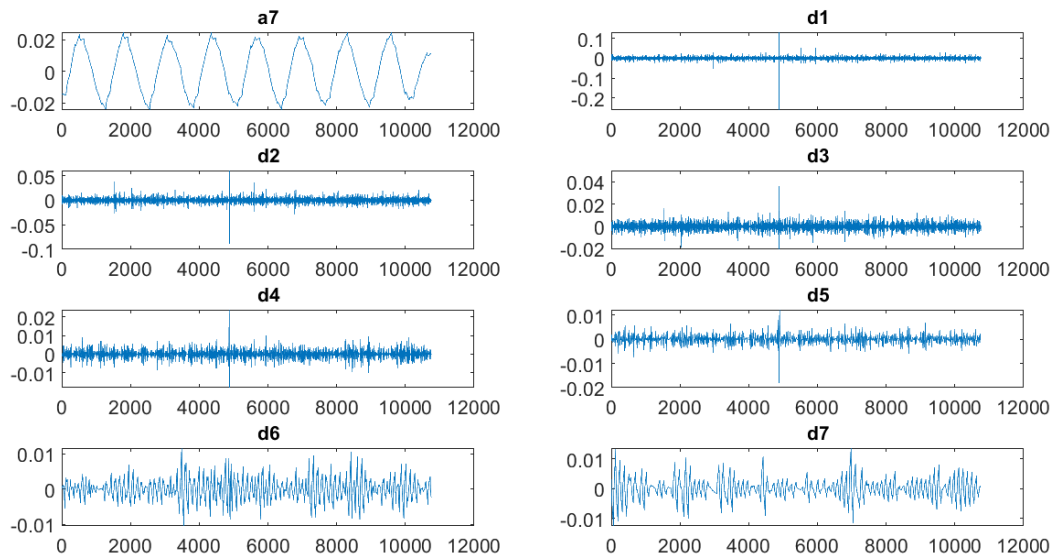


Рис. 3.2. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача

Для кожного елемента розкладання на рис. 3.2 за віссю абсцис відкладено час ( у кількості точок), а за віссю ординат – значення амплітуди, як і для оригінального сигналу на рис. 2.4.

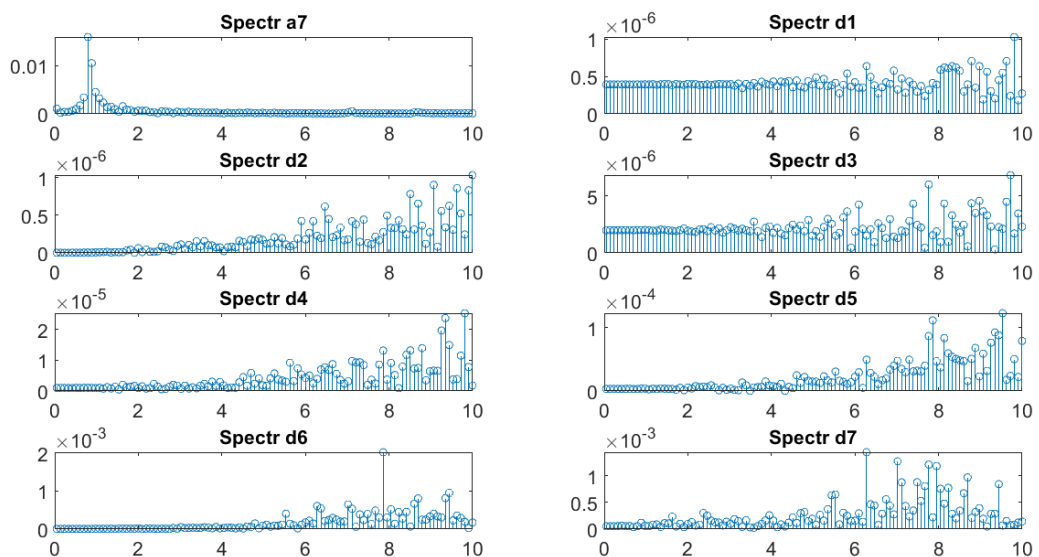


Рис. 3.3. Спектральна щільність елементів вейвлет-розкладання сигналу

На рис. 3.3 за віссю абсцис відкладено частоту в Гц, а за віссю ординат – значення спектральної щільності.

Спектр сигналу (рис. 2.6) зображений на рис. 3.4. Суттєвим інтервалом частот є інтервал до 2 Гц. Далі йде спектр шуму.

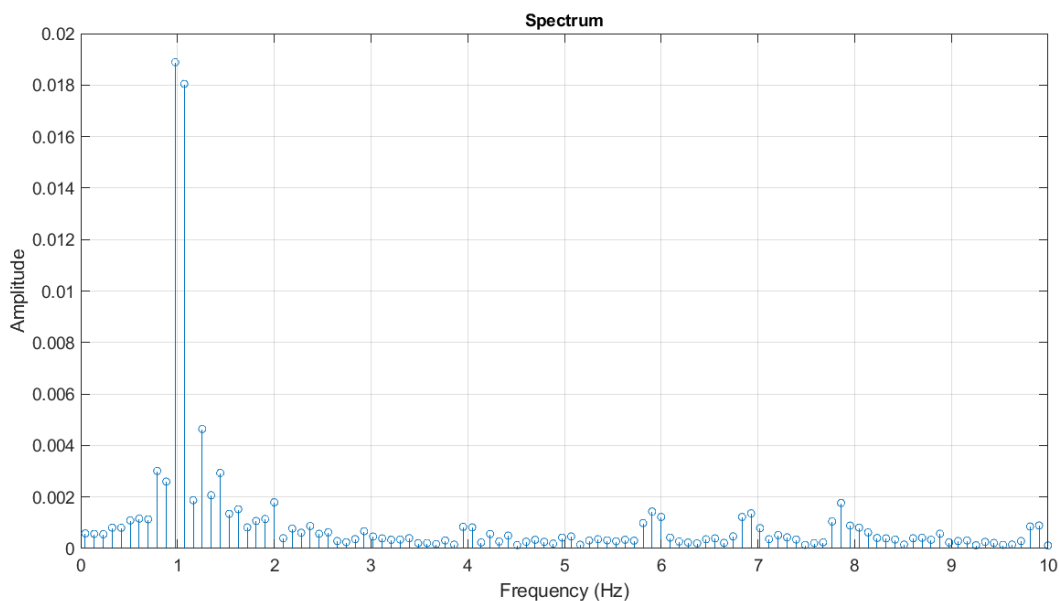


Рис. 3.4. Спектральна щільність сигналу сейсмічного приймача

Вейвлет – розкладання сигналу показано на рис. 3.5. Розкладання сигналу проводилось на 7 рівнів з використанням хвильової функції сімейства Добеші db2.

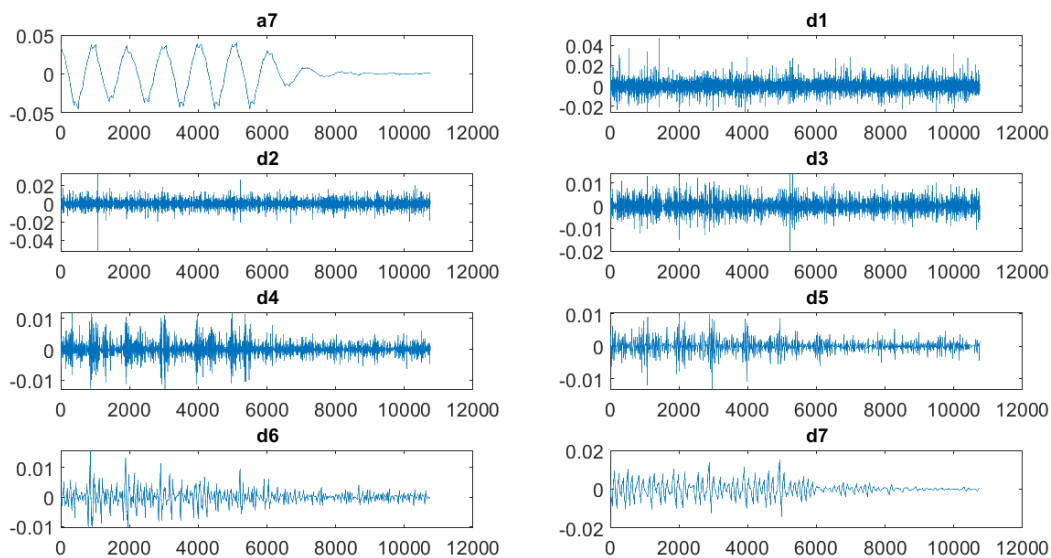


Рис. 3.5. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача

Для кожного елементу розкладання було проведено спектральну обробку, показана на рис. 3.6. Для сьомої апроксимації пораховано середнє значення  $\bar{x} = 3,18 \cdot 10^{-4}$ .

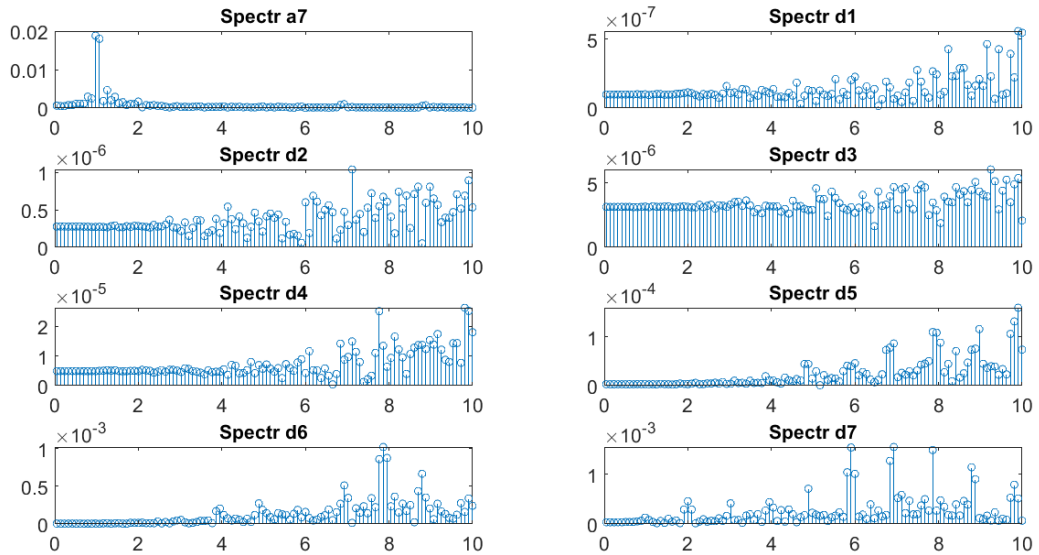


Рис. 3.6. Спектральна щільність елементів вейвлет-розкладання сигналу

Спектр сигналу, що показаний на рис. 2.7, зображено на рис. 3.7. Інтервал до 4 Гц є інтервал суттєвих частот, поза межами якого спектральна щільність є характеристикою шуму.

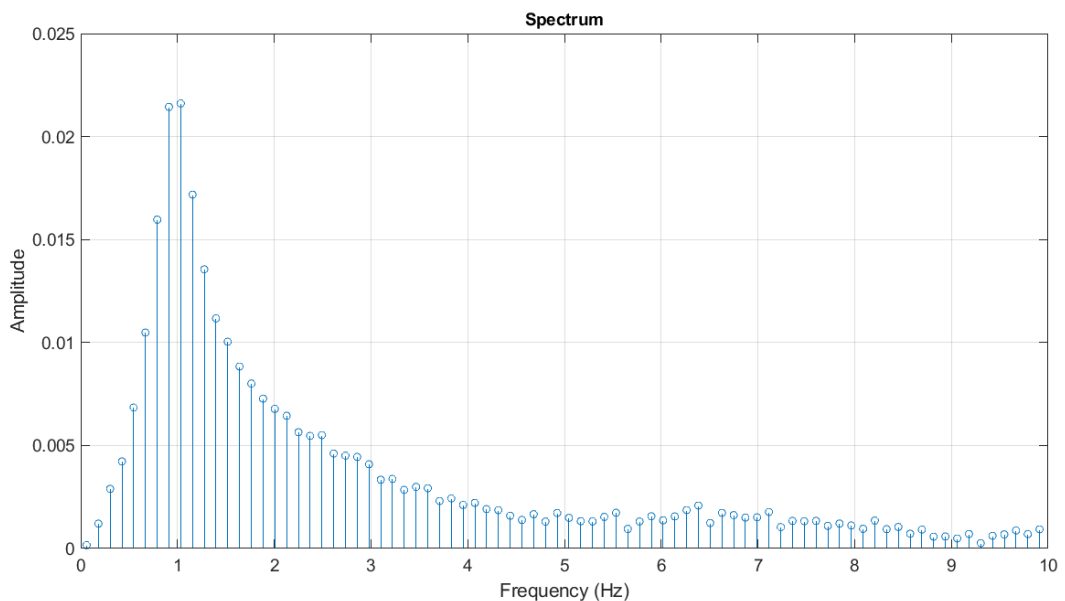


Рис. 3.7. Спектральна щільність сигналу сейсмічного приймача

Було проведено вейвлет – аналіз цього сигналу, показано на рис. 3.8. Розклад проводився на 7 рівнів рівнів з використанням хвильової функції сімейства Добеші db2. Середнє значення сьомої апроксимації становить  $\bar{x} = 7,17 \cdot 10^{-5}$ .

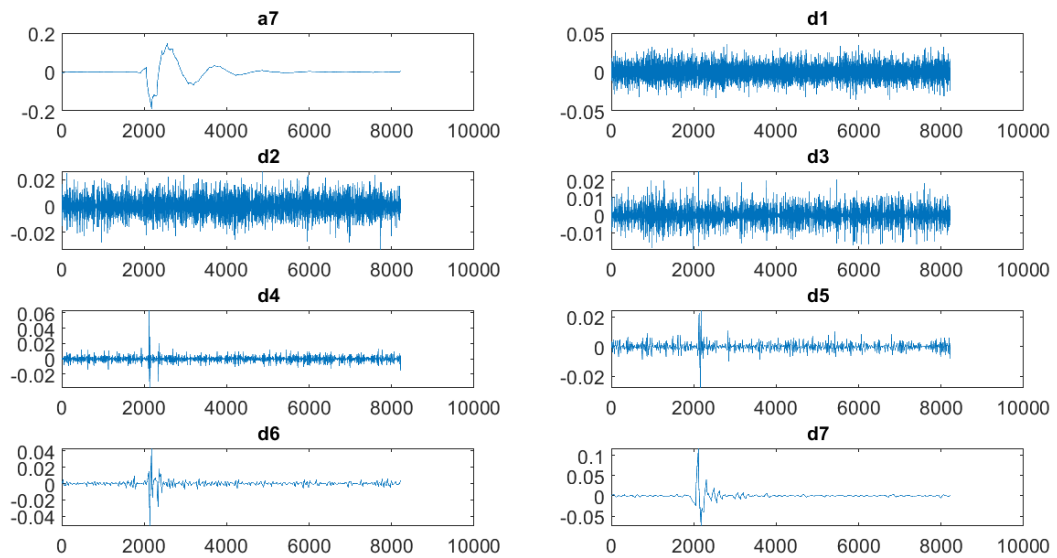


Рис. 3.8. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача

Для кожного з елементів вейвлет – розкладання було проведено спектральну обробку, результати показані на рис. 3.9.

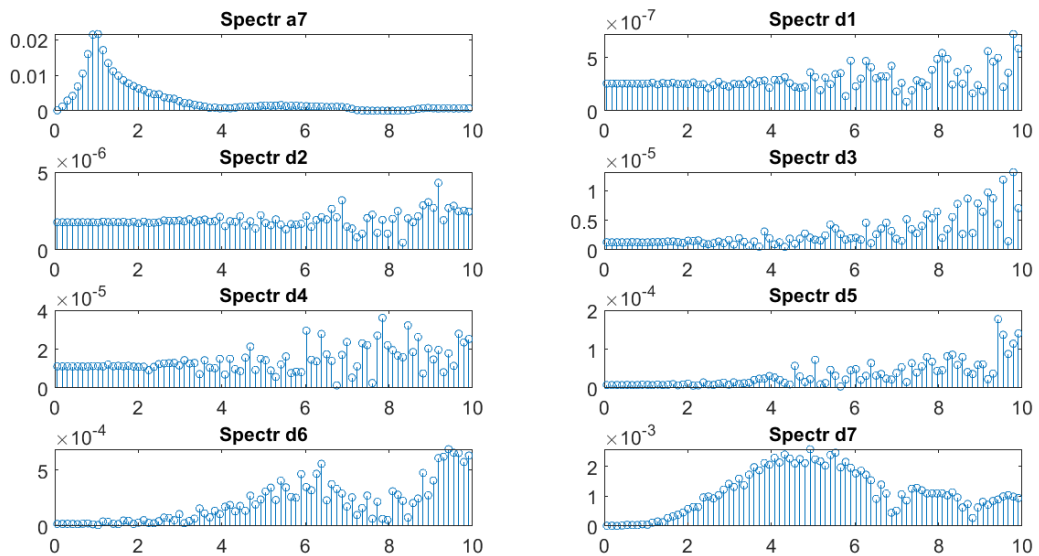


Рис. 3.9. Спектральна щільність елементів вейвлет-розкладання сигналу



Спектр сигналу, отриманий для усієї реалізації, що показана на рис. 2.8, наведений на рис. 3.10 і показує досить високу щільність спектральних амплітуд за частотою в інтервалі частот до 10 Гц. Власна частота приймача має значення 0,5 Гц, інтервал частот до 4 Гц можна вважати інтервалом суттєвих частот, поза межами якого спектральна щільність є характеристикою шуму.

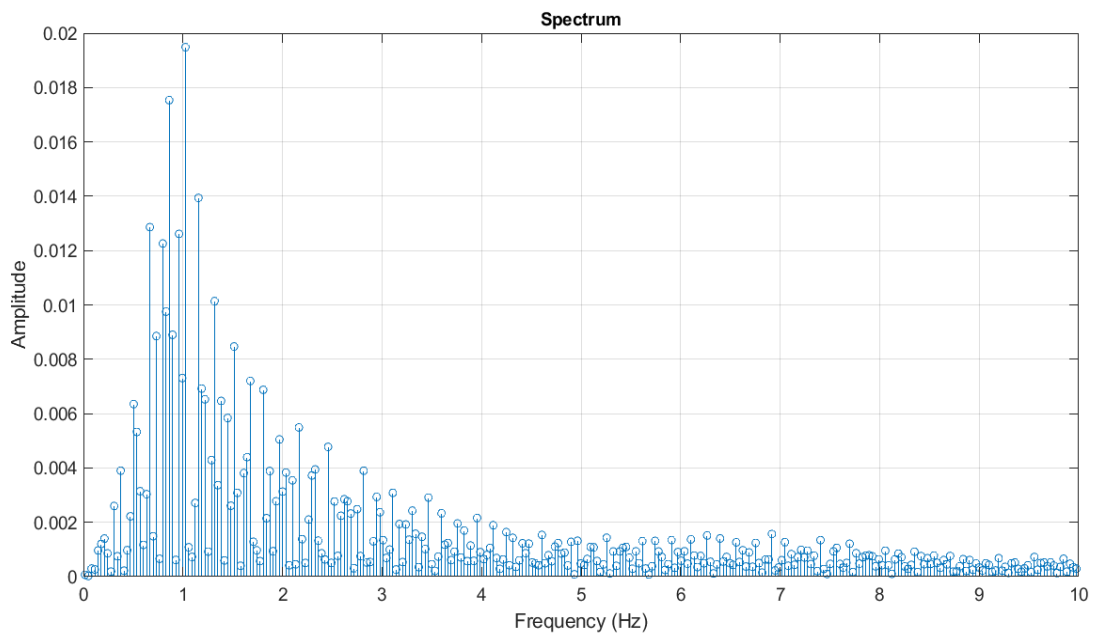


Рис. 3.10. Спектральна щільність сигналу сейсмічного приймача

Результати вейвлет – розкладання на 7 рівнів з використанням хвильової функції сімейства Добеші db2 наведено на рис. 3.11, а отримані спектральні щільності відповідних елементів розкладання – на рис. 3.12. Середнє значення сьомої апроксимації  $\bar{x} = 2,88 \cdot 10^{-5}$ .

Для кожного елемента розкладання на рис. 3.11 за віссю абсцис відкладено час (у кількості точок), а за віссю ординат – значення амплітуди, як і для оригінального сигналу на рис. 2.7. Відповідно, на рис. 3.12 за віссю абсцис відкладено частоту в Гц, а за віссю ординат – значення спектральної щільності.

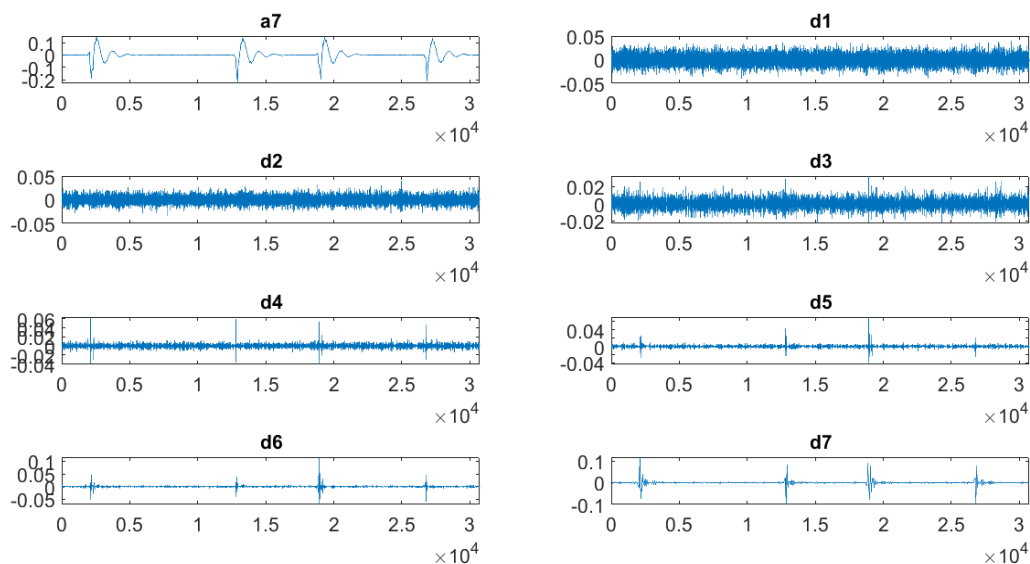


Рис. 3.11. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача

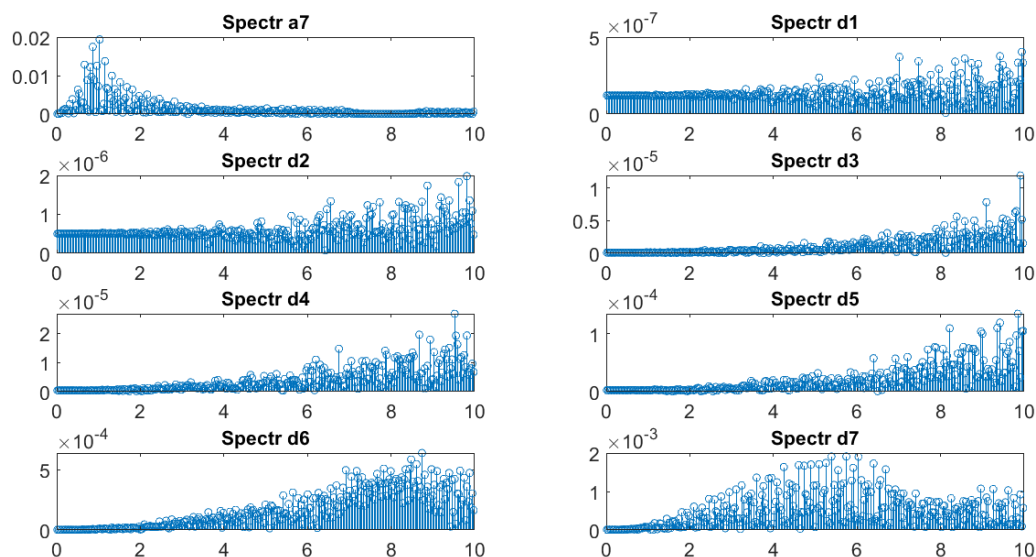


Рис. 3.12. Спектральна щільність елементів вейвлет-розкладання сигналу

Результати спектральної обробки сигналу (рис. 2.9) наведені на рис. 3.13. Інтервалом суттєвих частот є інтервал від 2 Гц до 5 Гц.

Результати вейвлет – розкладання показані на рис. 3.14 та рис.3.15 Сигнал був розкладений на 10 рівнів з використанням хвильової функції сімейства Добеші db10.

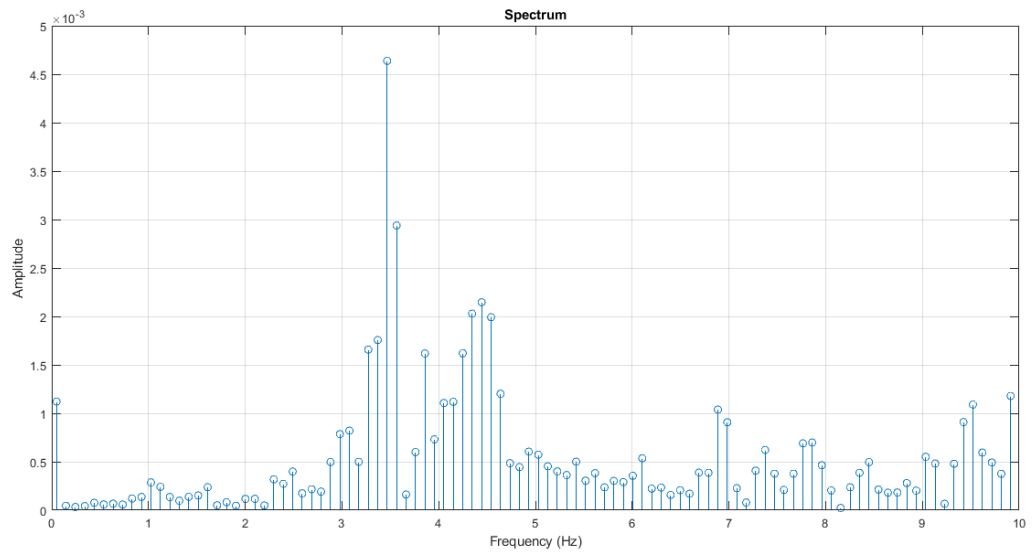


Рис. 3.13. Спектральна щільність сигналу сейсмічного приймача  
Середнє значення 10 апроксимації становить  $\bar{x} = 6,15 \cdot 10^{-4}$ .

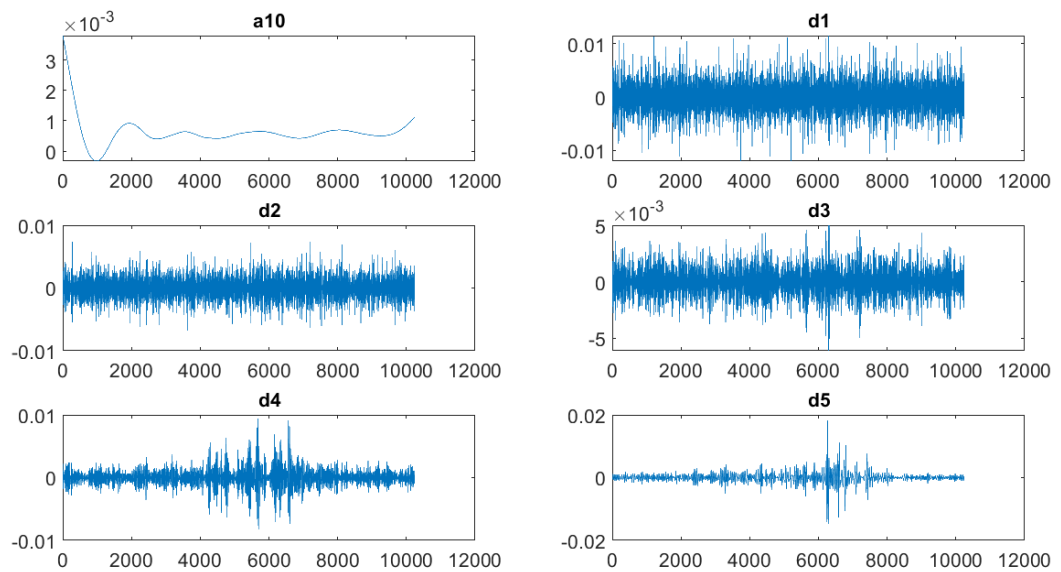


Рис. 3.14. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача  
(перші п'ять рівнів)

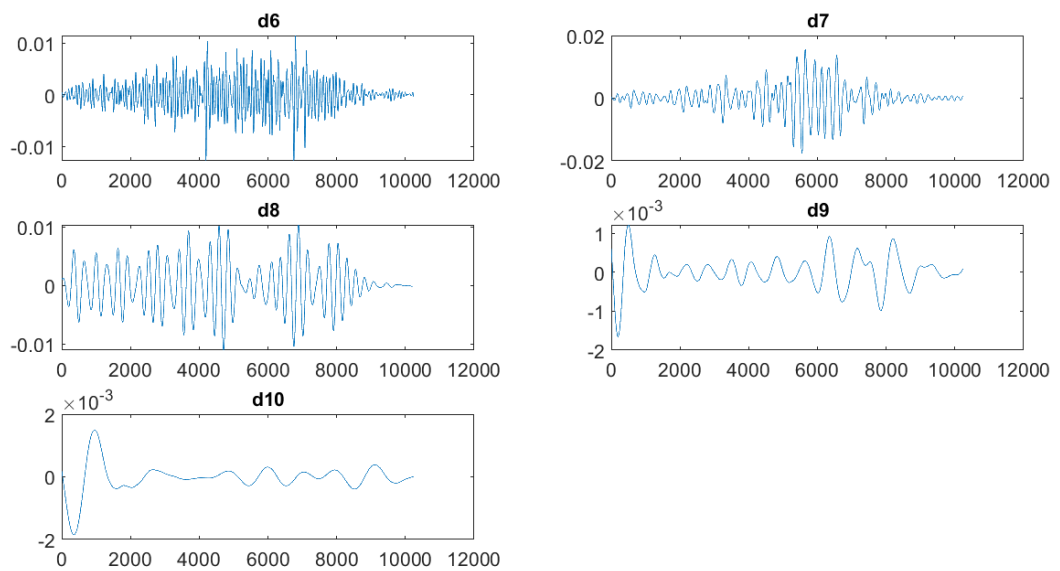
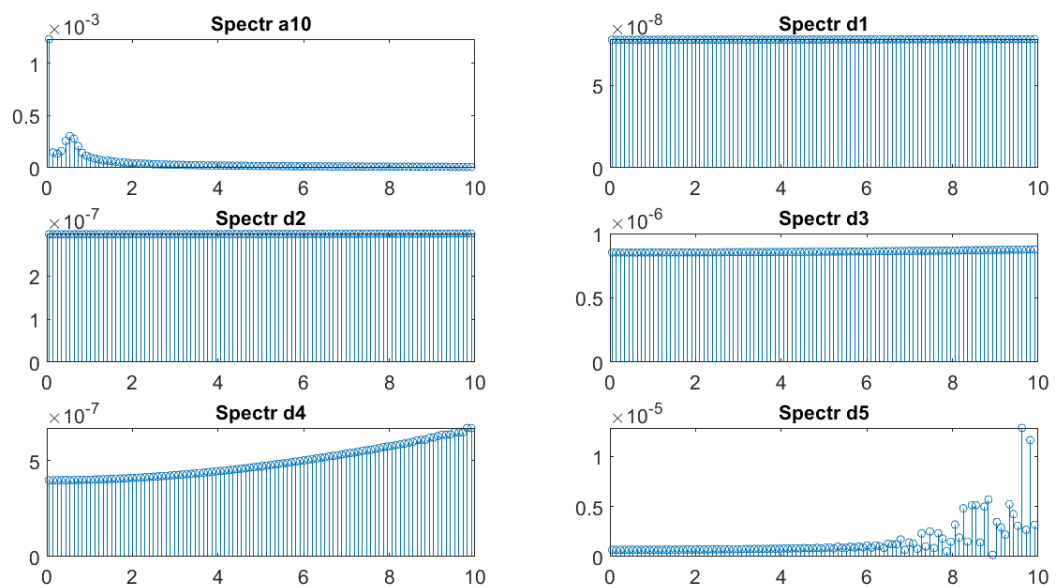
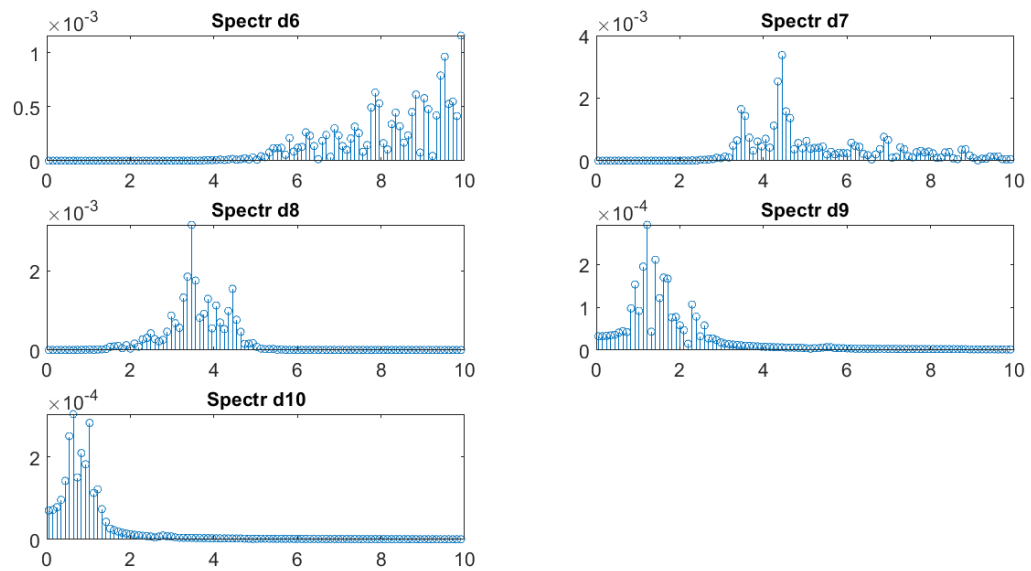


Рис. 3.15. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача  
(останні п'ять рівнів)

Для кожного з елементів вейвлет – розкладання була проведена спектральна обробка, результати якої показані на рис. 3.16.



a)



б)

Рис. 3.16. Спектральна щільність елементів вейвлет-розкладання сигналу: а) для перших п'яти рівнів та апроксимації; б) для останніх п'яти рівнів  
Спектр сигналу (рис. 2.10), отриманий для усієї реалізації наведено на рис. 3.17. Інтервалом суттєвих частот є інтервал від 5 Гц до 7 Гц.

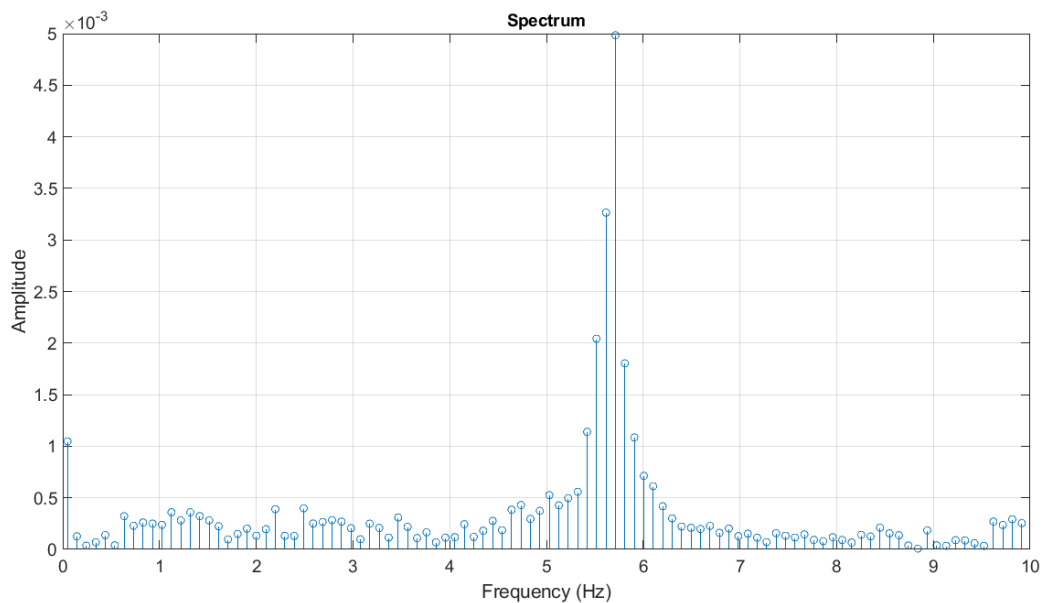


Рис. 3.17. Спектральна щільність сигналу сейсмічного приймача

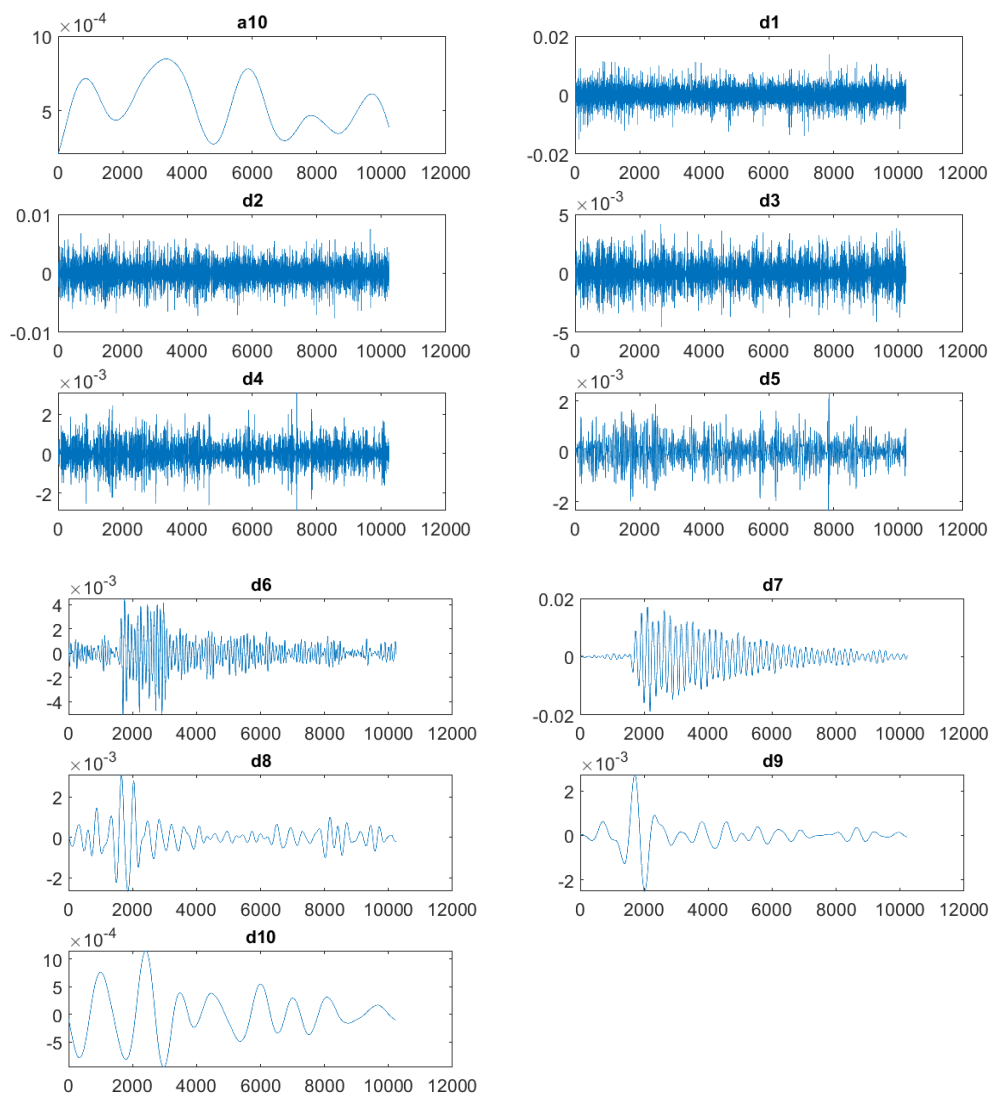


Рис. 3.18. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача

На рис. 3.18 показано вейвлет – розкладання сигналу на 10 рівнів з використанням хвильової функції сімейства Добеші db10. Середнє значення для десятої апроксимації  $\bar{x} = 5,36 \cdot 10^{-4}$ .

Результати спектральної обробки для кожного елементу вейвлет – розкладання показані на рис. 3.19.

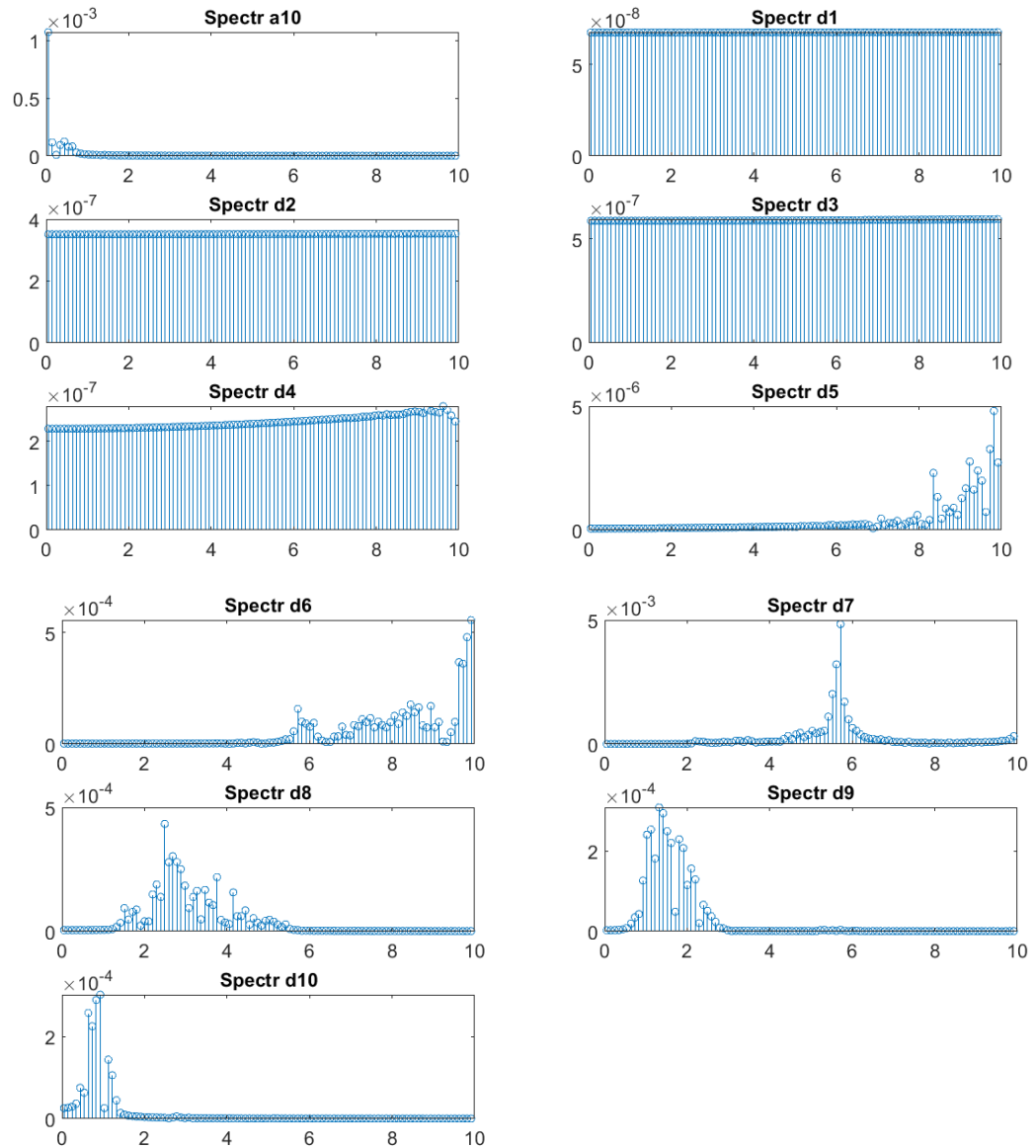


Рис. 3.19. Спектральна щільність елементів вейвлет-розкладання сигналу

Для сигналу, що зображений на рис. 2.11, було проведено спектральну обробку. Результати роботи показані на рис. 3.20. Також для сигналу було проведено вейвлет – розкладання на 10 рівнів з використанням хвильової функції сімейства Добеші db10. Результати цієї обробки показані на рис. 3.21. Також було пораховано середнє значення 10-ої апроксимації  $\bar{x} = 5,76 \cdot 10^{-4}$ .

Для кожного елемента вейвлет – розкладання проведена спектральна обробка, результати якої показані на рис. 3.22.

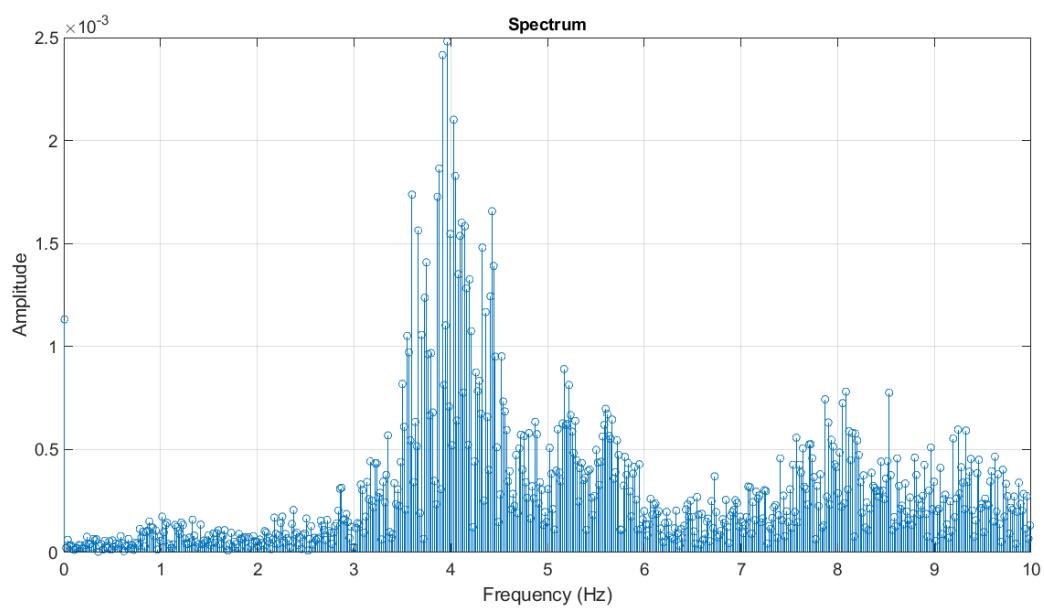


Рис. 3.20. Спектральна щільність сигналу сейсмічного приймача

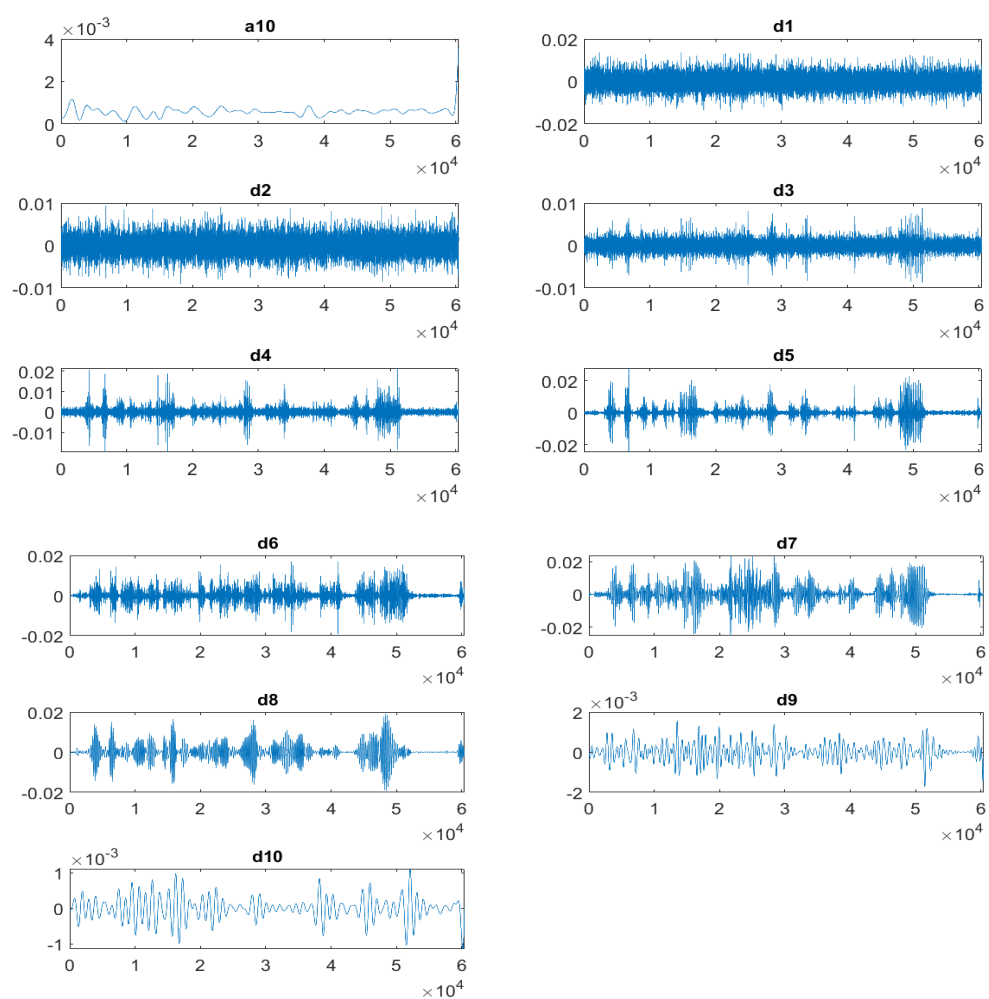


Рис. 3.21. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача



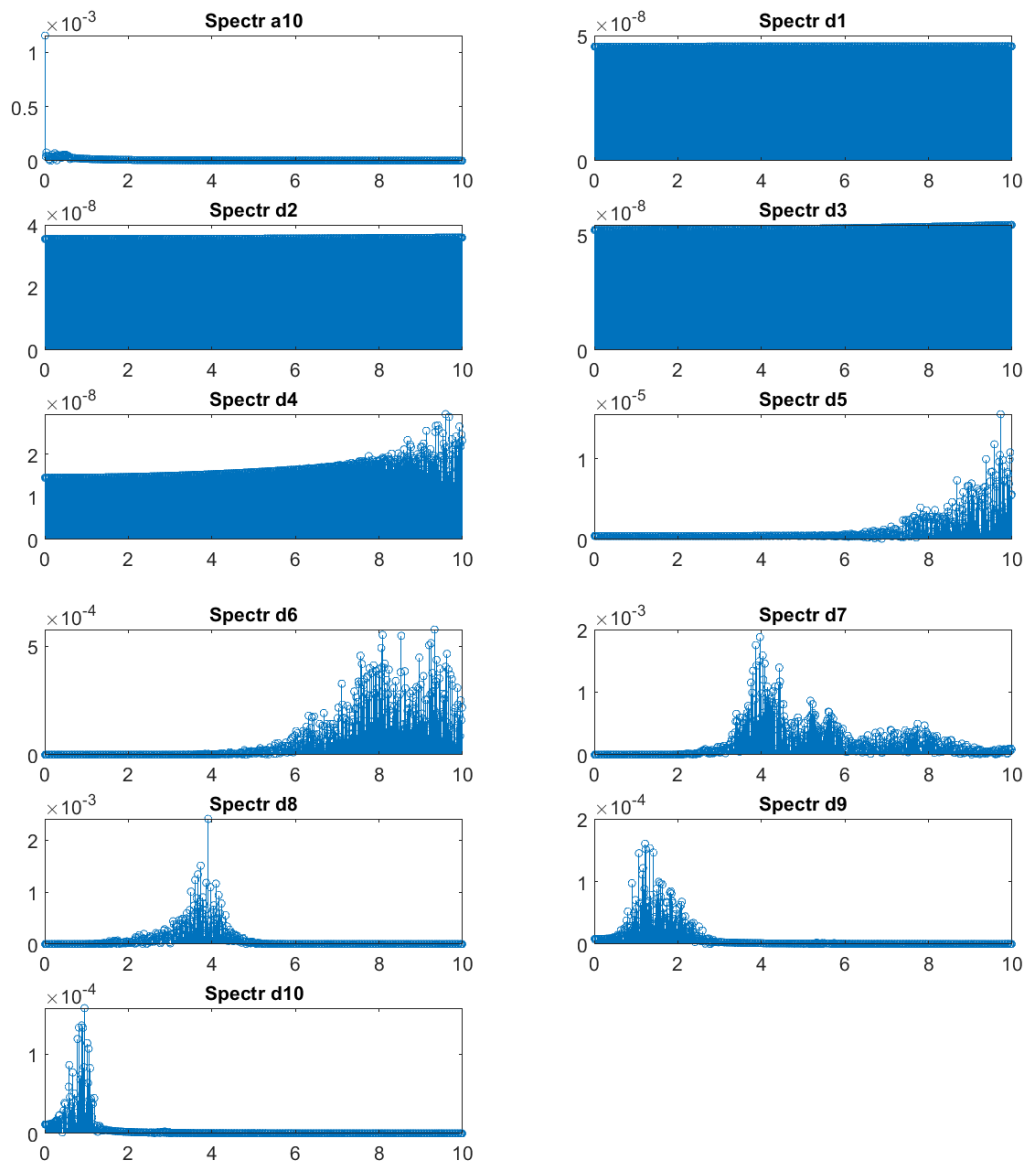


Рис. 3.22. Спектральна щільність елементів вейвлет-розкладання сигналу

Спектр сигналу, отриманий для усієї реалізації (рис. 2.12), наведений на рис. 3.23. На цьому спектрі видно, що найбільша частота знаходиться приблизно в нулі. Для сигналу, що зображений на рис. 2.11, було проведено вейвлет – розкладання на 10 рівнів з використанням хвильової функції сімейства Добеші db10. Результати показані на рис. 3.24. Для кожного елемента вейвлет – розкладання було проведено спектральну обробку, результати показні на рис. 3.25. Середнє значення 10-ої апроксимації  $\bar{x} = 6,99 \cdot 10^{-4}$ .

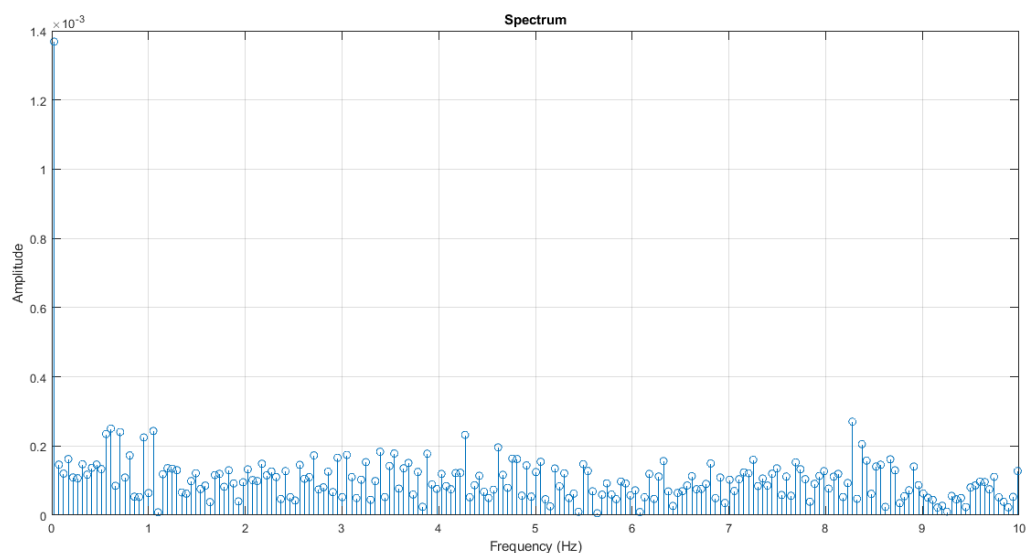


Рис. 3.23. Спектральна щільність сигналу сейсмічного приймача

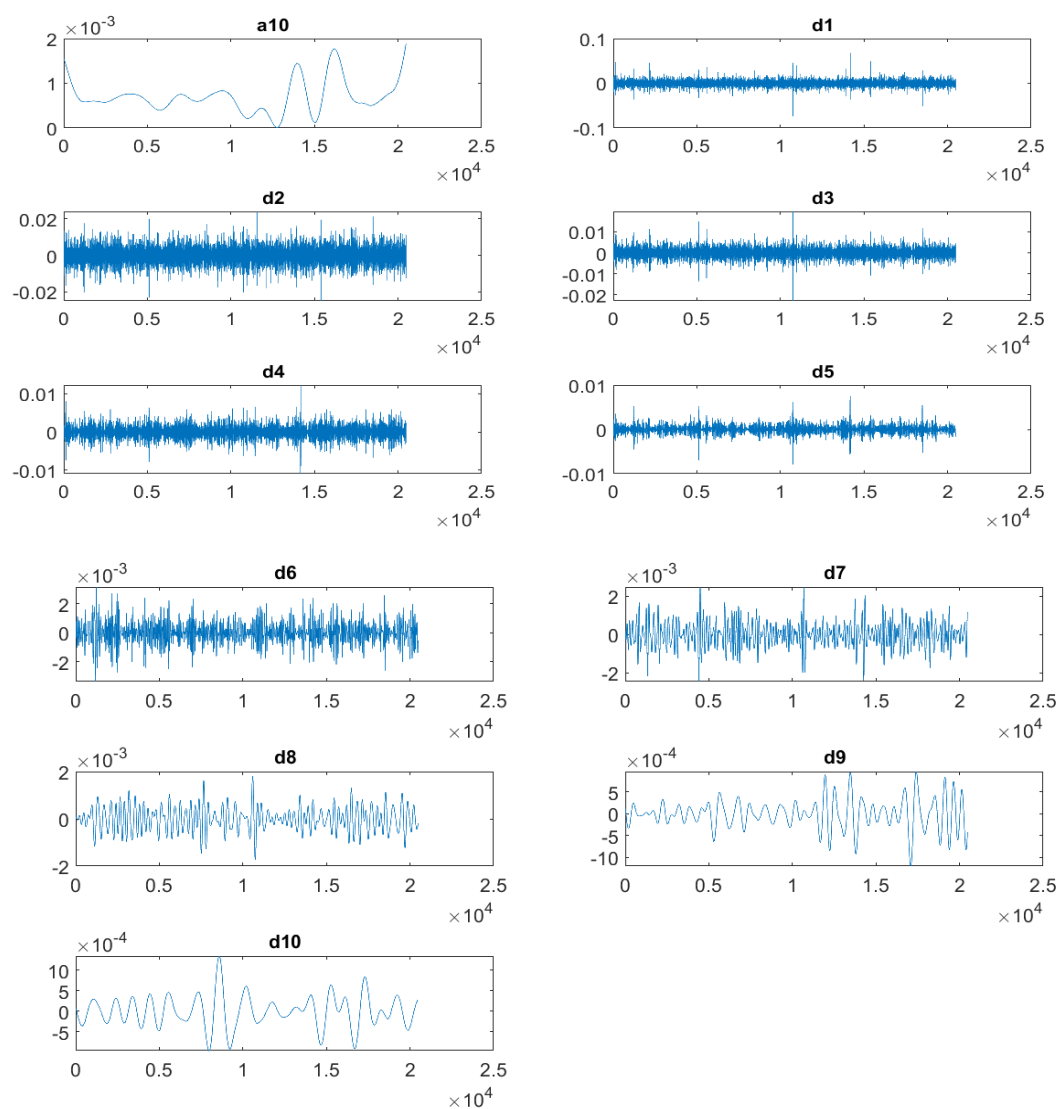


Рис. 3.24. Результати вейвлет – розкладання сигналу сейсмічного приймача

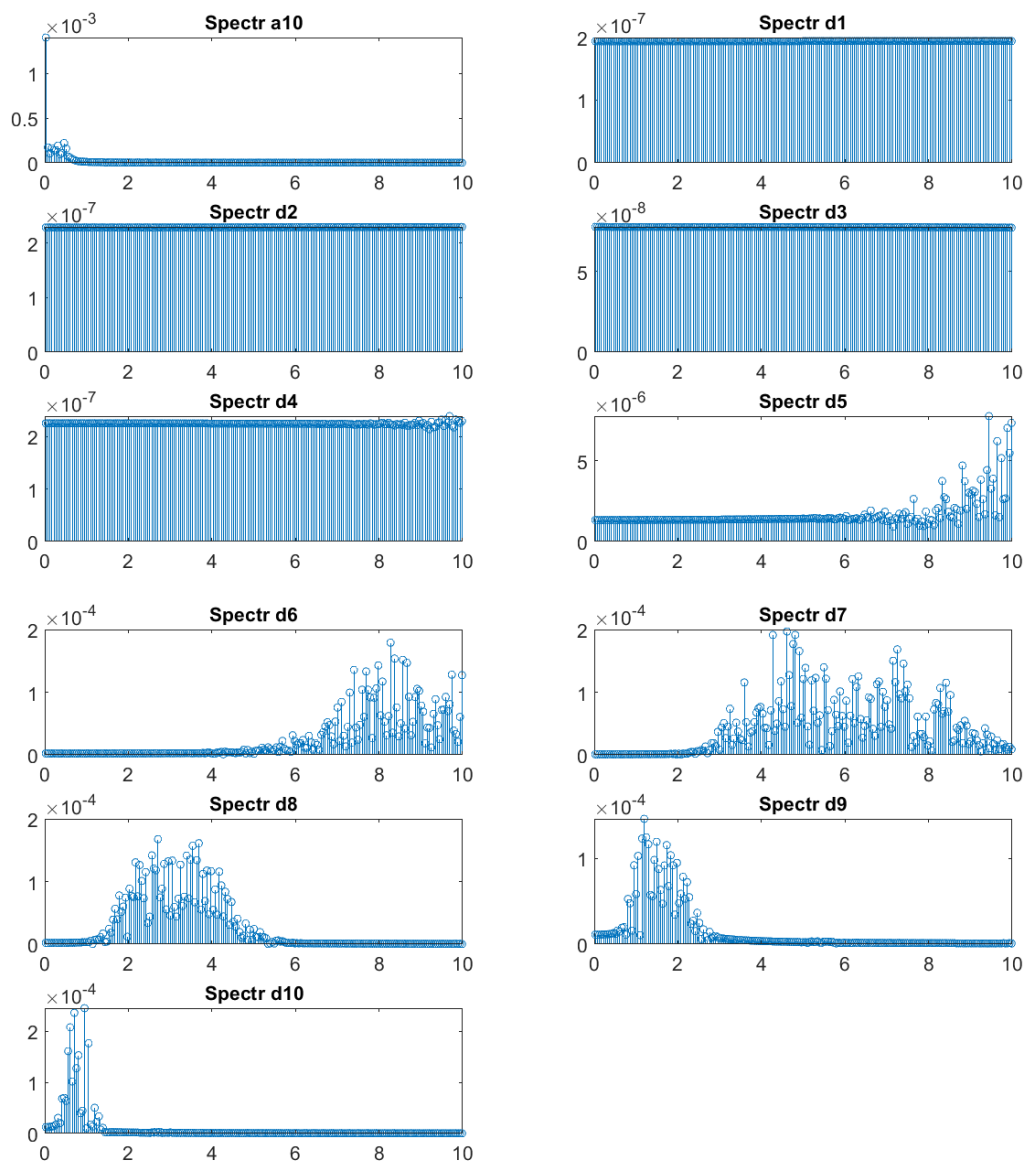


Рис. 3.25. Спектральна щільність елементів вейвлет-розкладання сигналу

Отримані результати дають можливість більш детально аналізувати, порівнювати та інтерпретувати сигнали сейсмічного приймача у його практичному застосуванні.

## **Висновки**

В даній роботі було розглянуто літературу, яка пов'язана з сейсмоприймачами, про перевірку споруд на сейсмічну стійкість, про вібраційні вимірювання, про системи для перевірки споруд на сейсміку.

Було розглянуто Сейсмоприймач великих переміщень ВБП – 3, його характеристики. Також розглянуто параметри та характеристики стендів на яких проводились дослідження.

Було розглянуто теорію про методи обробки інформації, а саме спектральний аналіз, вейвлет-аналіз та статистичний аналіз. Було отримано і проаналізовано спектральну щільність для реальних реалізацій вібраційних сигналів. До цих сигналів було застосовано вейвлет-перетворення та виконано розкладання вібраційних сигналів у набір апроксимацій і деталей. Також, для елементів вейвлет-розкладання визначено спектральну щільність.

Отримані результати дають можливість більш детально аналізувати, порівнювати та інтерпретувати сигнали сейсмічного приймача у його практичному застосуванні.

## Література

1. Kalil Erazo, Satish Nagarajaiah, Babak Moaveni Bayesian seismic strong-motion response and damage estimation with application to a full-scale seven story shear wall structure// Engineering Structures – 186, 2019. – С. 146-160.
2. ГОСТ 25051.3-83. Установки испытательные вибрационные. Методика аттестации (с Изменением N 1). – введ. 01.07.1984. - М.:Изд-во стандартов, 2003.
3. Ричард Бейкер Введение в теорию виброиспытаний : учеб. пособие / Р.Бейкер. – Х., 1994. – С. 44.
4. ISO 5344:2004 Electrodynamic vibration generating systems -- Performance characteristics
5. Особенности поверки сейсмоприемников [Электронный ресурс]// Режим доступа до ресурсу: <https://zetlab.com/podderzhka/seysmika/osobennosti-poverki-seysmopriemnikov/>
6. Виброускорение, виброскорость и виброперемещение [Электронный ресурс]// Режим доступа до ресурсу: <https://vibrocenter.ru/vibroacc.htm>
7. Сейсморазведочная аппаратура [Электронный ресурс]// Режим доступа до ресурсу: <https://studfiles.net/preview/6319973/page:9/>
8. ГОСТ 28134-89. СЕЙСМОПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ. Типы, основные параметры и технические требования [Электронный ресурс]// Режим доступа до ресурсу: <http://aquagroup.ru/normdocs/7625>
9. НАУКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ [Электронный ресурс]// Режим доступа до ресурсу: [http://www.ifz.ru/fileadmin/user\\_upload/documents/impotr/НТР\\_4\\_2016.pdf](http://www.ifz.ru/fileadmin/user_upload/documents/impotr/НТР_4_2016.pdf)
10. Безопасность сейсмического и воздушного воздействия массовых взрывов / Кутузов Б. Н., Совмен В.К., Эквист Б. В., Вартанов В. Г. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. 180 с.
11. Сейсмоприемник больших перемещений типа ВВП – 3. Временные методические указания по проверке. Приложение к ТО.

12. Мироненко П.С. Стенд для перевірки працездатності низькочастотних інерціальних модулів/ П.С. Мироненко, О.М. Павловський//Вісник КПІ. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2018. – Вип. 56(2). – С. 5-10.
13. Спектральный анализ сигналов [Електронний ресурс]// Режим доступу до ресурсу: <https://habr.com/ru/post/253447/>
14. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів: монографія / Н.І. Бурау, Л.Л. Яцко, О.М. Павловський, Ю.В. Сопілка [Текст]. - К.: НАУ, 2012.- 135с

# Додатки

## Додаток

### Лістинг 1 – Виведення сигналів та їх спектрів

```
clc
clearvars

%Number of periods
load('slcoleb.mat');
[Tk,~]=size(x);
fd = 1000;%Sampling frequency
%Td = 1/fd;%Sampling period
t = 0:1:Tk-1;
% x = x - mean(x);
F = -fd/2:(fd/(length(x)-1)):fd/2;%Frequency range
mPX = abs(fft(x))/length(F);%Fast Fourier Transform
SpecX = 2*fftshift(mPX);%Shift zero-frequency component to center of spectrum

figure
%Function graph
%subplot(2, 1, 1);
plot(t, x), grid;
title('Graph');
set(findall(gcf,'type','axes'),'fontsize',14);
set(findall(gcf,'type','text'),'fontsize',14);
xlabel('Time in samples');
ylabel('Amplitude');
% Spectral characteristic
figure
%subplot(2, 1, 2);
stem(F, SpecX), grid;
xlim([0 10]);
title('Spectrum');
set(findall(gcf,'type','axes'),'fontsize',14);
set(findall(gcf,'type','text'),'fontsize',14);
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Amplitude');
```

### Лістинг 2 – Розрахунки за формулами

```
clc
clear all
N=60415;
load('C:\Users\Карина\Desktop\Диплом\сигнал\Slozhniye_kolebaniya\slcoleb');
sz=1/N*sum(x);
summa=0;
for i=1:length(x)
summa=summa+(x(i)-sz).^2;
end
Dx=1/N*summa;
delx=sqrt(Dx);
```



### Лістинг 3 - Вейвлет – розкладання сигналів та побудова спектрів

```
load('C:\Users\Карина\Desktop\Диплом\сигнал\запуск на маленьком
стенде\stendmal');
db='db10';
j = 10;
k = j + 1;
if j > 3
    k = 4;
end
n = 2;
[c,l] = wavedec(x,j,db);
figure;
%subplot(k,2,[1 2]);
%plot(x);
%title('Signal');
a10 = wrcoef('a',c,l,db,10);
subplot(k,2,1);
plot(a10);
title('a10');
set(findall(gcf,'type','axes'),'fontsize',16)
set(findall(gcf,'type','text'),'fontSize',16)
for i=1:j
    di = wrcoef('d',c,l,db,i);
    subplot(k,2,n);
    plot(di);
    title(strcat('d',int2str(i)));
    set(findall(gcf,'type','axes'),'fontsize',16)
    set(findall(gcf,'type','text'),'fontSize',16)
    n = n+1;
    if n > 8
        figure;
        n=1;
    end
end
%T = 1;
% k = 0:63;
f = 1000;
figure;
a10 = wrcoef('a',c,l,db,10);
N = length(a10);
F = -f/2:(f/(N-1)):f/2;%Frequency range
mPX = abs(fft(a10))/length(F);%Fast Fourier Transform
SpecX = 2*fftshift(mPX);
subplot(k,2,1);
stem(F,SpecX);
xlim([0 10]);
title('Spectr a7');
set(findall(gcf,'type','axes'),'fontsize',16)
set(findall(gcf,'type','text'),'fontSize',16)
n = 2;
for i=1:j
    %figure;
    di = wrcoef('d',c,l,db,i);
    N = length(di);
    %F = (0:(N-1))*(f/2);
    F = -f/2:(f/(N-1)):f/2;%Frequency range
    mPX = abs(fft(di))/length(F);%Fast Fourier Transform
    SpecX = 2*fftshift(mPX);
    %%%%%%%%%%%
    %Y=fft(di,N);
    %Pyy = Y.*conj(Y)/N;
    %f=1000*(0:255)/N;
```

```

%stem(f, Pyy(0:256));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(k,2,n);
stem(F, SpecX);
xlim([0 10]);
title(strcat('Spectr d',int2str(i)));
set(findall(gcf,'type','axes'),'fontSize',16)
set(findall(gcf,'type','text'),'fontSize',16)
n = n+1;
if n > 8
    figure;
    n=1;
end
end
N=10239;
sz=1/N*sum(a10);

```